



Ferdowsi
University of
Mashhad

Ferdowsi Civil Engineering

<https://civil-ferdowsi.um.ac.ir>



Iranian
Concrete
Institute



Pavement
Engineering
Association of
Iran

System Dynamic Based Project Duration Simulation of Construction Projects

Research Article

Yaghoob Alipouri¹ , Zahra Tajabadi²

DOI: [10.22067/jfcej.2026.93175.1355](https://doi.org/10.22067/jfcej.2026.93175.1355)

1. Introduction

Construction projects, characterized by their intricate nature and high interdependence of components, are perpetually plagued by challenges such as delays, rework, and cost fluctuations. This research is formulated to model and simulate the System Dynamics (SD) governing these projects within the Iranian context. The primary objective is to identify the underlying feedback structures, critical variables, and complex interactions that indirectly influence productivity and project duration. A comprehensive literature review highlighted a gap: despite the existence of SD models for analyzing delay factors or the impact of BIM, no holistic model specifically addresses the dynamic structures of Iranian projects, focusing on managerial and financial factors (e.g., liquidity and payment delays). This identified gap serves as the main motivation for this study.

2. Methodology

The research methodology is firmly rooted in System Dynamics (SD) Modeling. This approach enables the representation and simulation of system behavior over time, particularly in the face of delays and complex feedback loops. The model is constructed based on six key causal and feedback loops. These loops illustrate factors such as the iterative effect of remaining work on the demand for resources (machinery and manpower), the impact of reduced safety compliance on legal and contractual issues, and most crucially, the relationship between **payments to the contractor**, employee motivation, productivity, and the work progress rate. Variables such as the number of machinery, machinery efficiency, workspace size, maintenance, and resource allocation are incorporated to provide a comprehensive picture of the project's operational flow (Fig 1).

The structural and behavioral validity of the developed SD model was examined through a multi-phase verification process. Initially, the causal loop diagrams

were refined based on experts' feedback, followed by sensitivity analysis and behavioral comparison between the simulated results and real project data from Iranian construction cases. The modeling process in Vensim PLE consisted of qualitative and quantitative stages, where mathematical formulations were derived for each stock and flow variable to represent the dynamic interdependencies among financial resources, workforce motivation, training, and contractual issues. In this study, the accuracy of the model was investigated by structural analysis test, structural behavior test, ultimate limit test, and reference behavior reconstruction test. Fig 2 shows the accuracy and validity of the model based on the structural evaluation test. This level of validation ensures that the model reliably reproduces the actual behavior of construction projects and serves as an effective analytical tool for testing managerial policies in nonlinear and complex environments.

3. Findings and Scenario Analysis

System behavior was simulated under Scenario One (Current Conditions) to benchmark the baseline performance of key variables. Subsequently, two policy-driven scenarios were examined:

1. Scenario Two (Personnel Rigor): This scenario assumed reductions in training, R&D investment, and the ratio of salary to work volume, coupled with a significant increase in employer delays in payments (up to 60 days). Results indicated that while delayed payments directly affect the contractor's liquidity and morale, the reduction in investment in training and R&D introduces long-term detrimental effects on quality and the rate of correct work completion.
2. Scenario Three (Impact of Employer's Refusal to Change Execution Method): This scenario focused on the consequences of the employer's inflexibility in adopting optimized execution methods, which directly strains the budget and schedule.

* Manuscript received April 27, 2025, Revised December 28, 2025, Accepted February 23, 2026.

¹ Corresponding author. Assistant Professor, Innovative Technologies Center for Construction Management, Department of Construction Engineering and Management, Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. Email: y.alipouri@kntu.ac.ir.

² MSc Graduated, Department of Construction Engineering and Management, Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

The findings strongly suggest that stable and timely cash flow to the contractor acts as a vital balancing loop capable of moderating the adverse effects stemming from initial poor design quality or necessary rework.



4. Conclusion and Future Directions

The developed model provides a robust framework for understanding the dynamics of construction delays in Iran. For future studies, further model refinement is strongly recommended, including the detailed modeling of procurement risks, macroeconomic conditions, and the integration of this SD model with other approaches like Building Information Modeling (BIM) to quantify the benefits derived from reducing design errors.

In future research, expanding the proposed SD framework through integration with Building Information Modeling (BIM) and Artificial Intelligence (AI) can substantially enhance managerial insight into the complex dynamics of construction projects. The coupling of SD

with BIM allows dynamic behaviors to be visualized within a three-dimensional project environment, facilitating more accurate prediction of delays, activity interferences, and the consequences of operational decisions. Moreover, applying machine learning algorithms to automatically calibrate model parameters will improve adaptability and predictive accuracy based on real project data. This extension will pave the way for an intelligent decision-support system, capable of assisting managers in strategic planning and performance optimization across large-scale infrastructure projects.



شبیه‌سازی مبتنی بر پویایی سیستم مدت زمان پروژه‌های عمرانی*

مقاله پژوهشی

زهرا تاج‌آبادی^(۲)

یغوب علیپوری^(۱)

DOI: 10.22067/jfeci.2026.93175.1355

چکیده در این پژوهش، پس از شناسایی پارامترهای مؤثر بر زمان پروژه‌های عمرانی، از رویکرد تفکر سیستمی و روش پویایی‌شناسی سیستم‌ها برای ریشه‌یابی علل، یافتن روابط و بازخورد بین عوامل مختلف به منظور شناخت و یادگیری جامع‌تر استفاده شد. برای شناسایی عوامل مؤثر بر مدت زمان پروژه‌ها از مطالعات کتابخانه‌ای و مصاحبه دلفی با ۲۲ نفر از خبرگان بهره گرفته شد. پس از آن، مدل‌های مفهومی ذهنی مبتنی بر حلقه‌های علت و معلولی برای شناخت بهتر روابط بین عوامل شناسایی شده ایجاد شد و سپس با استفاده از رویکرد حاکم بر روش شبیه‌سازی پویایی سیستم، به تدوین یک نمودار حالت جریان برای درک بهتر و یادگیری و همچنین تحلیل پویای مسئله تحقیق پرداخته شد. صحت مدل جریان انباشت با آزمون‌های ارزیابی ساختاری، رفتار ساختاری، حد نهایی و بازسازی رفتار مرجع سنجیده شد و چهار سناریوی اصلی تدوین و بر اساس آن‌ها رفتار و عملکرد مدل مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی در چهار سناریو نشان داد مؤثرترین اهرم‌ها برای تسریع پروژه، به حداقل رساندن تغییرات دامنه/روش ناشی از کارفرما و سرمایه‌گذاری استراتژیک در توسعه منابع انسانی (آموزش و جبران خدمات عادلانه) است، که با بهبود کارایی سیستم، به طور قابل توجهی تأخیرات پروژه را کاهش می‌دهد. نتایج به دست آمده تأییدکننده عملکرد صحیح مدل پیشنهادی است. امید است که به واسطه درک حاصل شده از سیستم پیشنهادی، زمینه و مبنای لازم برای اتخاذ تصمیمات بهتر و کارآمدتر در حوزه مدت زمان پروژه‌ها فراهم شود.

واژه‌های کلیدی برنامه زمان‌بندی، مدیریت پروژه، پویایی‌شناسی سیستم‌ها، حلقه‌های علت و معلولی، پروژه‌های عمرانی.

System Dynamic Based Project Duration Simulation of Construction Projects

Yaghoub Alipouri

Zahra Tajabadi

Abstract In this study, after identifying the factors and parameters affecting the duration of construction projects, the system thinking approach and system dynamics method are used to find the root causes, relationships and feedback between the factors. Library studies were used to identify the factors affecting the duration of the projects and Delphi interviews with 22 experts were used to improve and supplement these factors. Then, a conceptual model based on causal loops is presented to better understanding of the relationships between variables. Afterwards, using the approach governing the system dynamics method, a flow diagram is compiled to better understand and learn and also to more dynamic analysis of the research problem. The accuracy of the accumulation flow model has been measured with some tests, including reviewing and evaluating the behavior and structure of the model, and also four main scenarios were formulated for implementing different executive policies. Based on the results, the behavior and performance of the model have been evaluated and analyzed. The results obtained from the evaluations confirm the correct performance of the proposed model. Simulation results across four scenarios demonstrated that the most effective levers for project acceleration are the minimization of owner-driven scope/method changes and the strategic investment in human resource development (training and fair compensation), which significantly mitigate project delays by improving system efficiency. It is hoped that the understanding gained from this learning system will provide the necessary basis for making better and more efficient decisions in the field of project time

Key words Scheduling program, Project management, Systems dynamics, Causal loops, Construction projects.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۴/۲/۷ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۱۲/۰۴ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول، استادیار، آزمایشگاه فناوری های نوین در مدیریت ساخت، گروه مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی

Email: y.alipouri@kntu.ac.ir

خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

(۲) دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

مقدمه

مدت زمان انجام یک طرح سازه‌ای در مقدار سرمایه‌گذاری و بازدهی سرمایه هزینه‌شده در آن طرح، رابطه مستقیم دارد. با ازدیاد مدت زمان اجرا و دیرکرد پروژه نسبت به برنامه زمان‌بندی‌شده سرمایه زیادی اعم از سرمایه مالی، نیروی انسانی، ماشین‌آلات و تجهیزات در پروژه بلوکه و تلف می‌شود. ساختار پروژه‌های ساختمانی از فاکتورهای مختلفی اثر می‌پذیرد. شرایط اقتصادی، موقعیت جغرافیایی، دسترسی به مصالح، نیروهای متخصص و کاری بومی، مدیریت دستگاه‌های اجرایی و فرهنگ بومی منطقه در تسریع یا تأخیر پروژه اثر می‌گذارد. بنابراین، هر منطقه‌ای عوامل اثرگذار مربوط به خود را بر روی زمان پروژه‌ها دارد. از این رو، شناخت پارامترها و عوامل مؤثر در تعیین مدت زمان پروژه‌های عمرانی برای هر منطقه‌ای اهمیت ویژه‌ای دارد و لازم است انجام بگیرد.

شکاف در برنامه زمان‌بندی معلول عللی است که شناخت آن‌ها و تعیین اهمیت این عوامل می‌تواند ما را در ارائه راهکار اجرایی مناسب برای پروژه‌ها یاری کند [1]. اگر زمان تحقق پروژه بیشتر از زمان برنامه‌ریزی پروژه باشد، ممکن است کاهش سود پروژه، اتلاف فرصت‌ها، ازدیاد هزینه‌های پروژه و مهم‌تر از همه اختلال در توجیه اقتصادی پروژه‌ها مطرح باشد. از این روی، لازم است از رخداد عوامل مخرب در زمان‌بندی پروژه که منجر به تطویل آن می‌شود جلوگیری به عمل آید تا بتوان به صرفه‌جویی در هزینه‌ها و زمان صرف‌شده برای انجام پروژه نائل آمد. مطالعات و تلاش‌های متفاوتی به منظور مدیریت بهتر پروژه‌ها صورت گرفته است. علی‌رغم همه این تلاش‌ها، پروژه‌ها در اکثر مواقع با شکست روبه‌رو می‌شوند. انحراف از برنامه و افزایش هزینه‌ها به قانونی برای اکثر پروژه‌ها تبدیل شده است و نبود روشی کل‌نگر و در نهایت عدم توجه به بعد غیرخطی و پویای پروژه‌ها به معضلی برای مدیران پروژه تبدیل شده است [2].

در پژوهش حاضر، با استفاده از ابزار پویایی سیستم‌ها (SD) سعی بر آن است تا پس از شناسایی عوامل مؤثر بر مدت زمان پروژه‌ها، نحوه ارتباط و تأثیر این عوامل بر روی همدیگر و بر روی زمان پروژه‌های عمرانی مشخص شود تا از طریق مدل پیشنهادی ابزار مناسبی برای مدیریت پروژه‌ها فراهم آید. این پژوهش از حیث به‌کارگیری ابزار پویایی سیستم‌ها در بررسی عوامل مؤثر بر زمان پروژه‌ها از نوآوری برخوردار است.

بر این اساس، ادامه این نوشتار به این صورت سازمان‌دهی شده است که در ابتدا پیشینه پژوهش مرتبط با موضوع پژوهش در دو زیربخش شناسایی پارامترهای مؤثر بر مدت زمان پروژه‌ها و کاربردهای ابزار پویایی سیستم‌ها در صنعت ساخت‌وساز، مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس، در بخش سوم، روش تحقیق این پژوهش تشریح می‌شود. یافته‌های تحقیق در بخش چهارم تبیین می‌شود و تجزیه و تحلیل داده‌های گردآوری‌شده و همچنین تشریح مدل پیشنهادی در این بخش فراهم می‌شود. در این بخش، همچنین بر روی نتایج و مدل‌ها بحث و بررسی شده و چهار سناریوی مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. نهایتاً، در بخش پنجم نتیجه‌گیری این پژوهش ارائه شده و نوآوری‌های پژوهش ذکر می‌شود و همچنین پیشنهادات محقق برای پژوهش‌های آتی تشریح می‌گردد.

پیشینه پژوهش

با توجه به هدف این پژوهش که شبیه‌سازی مبتنی بر پویایی - سیستم مدت زمان پروژه‌های عمرانی است، لازم است از دو حیث به بررسی پیشینه پژوهش پرداخته شود؛ نخست مقالات و منابع مرتبط در حوزه بررسی عوامل و پارامترهای مرتبط با زمان و برنامه زمان‌بندی پروژه بررسی شود و سپس پیشینه پژوهش در راستای کاربرد روش پویایی‌شناسی سیستم‌ها در صنعت ساخت-وساز بررسی گردد.

پارامترهای مؤثر بر مدت زمان پروژه‌ها

سامباسیوان و سون [3] در سال ۲۰۰۷ در پژوهش خود ده دلیل مهم تأخیرات در صنعت ساخت‌وساز مالزی را شامل مواردی می‌دانستند که عبارت بود از برنامه‌ریزی نامناسب پیمانکار عمومی، مدیریت ضعیف کارگاه ساختمانی توسط پیمانکار عمومی، تجربه ناکافی پیمانکار عمومی، تأمین مالی نامناسب و پرداخت ناکافی کارفرما برای کار تکمیل‌شده، مشکلات با پیمانکاران فرعی، کمبود مواد و مصالح، مشکلات تأمین نیروی کار، دسترسی به تجهیزات، عدم ارتباط کافی بین ذی‌نفعان و اشتباهات اجرایی. از نظر این پژوهشگران شش اثر اصلی تأخیر عبارتند از افزایش زمان، افزایش هزینه، ایجاد اختلافات، داوری و دعاوی قضایی و ترک کل کار [3]. ندکوگری و همکاران [4] در سال ۲۰۰۸ بر اساس نتایج پژوهش خود مطرح کردند که به

اولابی و همکاران [9] در سال ۲۰۱۴ مهم‌ترین علل تأخیر در پروژه‌های عمرانی را ضعف در تأمین مالی پروژه، تغییرات نقشه، نبود ارتباط مؤثر بین طرف‌های درگیر در پروژه، کمبود اطلاعات کافی از سوی مشاور، تصمیم‌گیری ضعیف و ورشکستگی پیمانکار معرفی کردند. همچنین مشکلات کنترل پروژه، اشتباهات و اختلافات در متن قرارداد، در دسترس نبودن و عدم کارکرد تجهیزات، اشتباهات حین ساخت، آب و هوای بد، نوسانات قیمتی مواد و مصالح و همچنین ساختار سازمانی ضعیف نیز از جمله سایر عوامل تأثیرگذار در تأخیر یک پروژه در این مقاله معرفی شدند [9]. تفضلی و شرستا [10] نیز در سال ۲۰۱۷ علل تأخیر در پروژه‌های ساخت‌وساز ایالات متحده را شناسایی کردند. این پژوهشگران، با توجه به نتایج پژوهش خود، همکاری کارفرما با تیم ساخت‌وساز، کیفیت طراحی و ارتباط میان ذی-نفعان را مهم‌ترین عوامل مربوط به تأخیر در مدت زمان پروژه‌ها برشمردند. همچنین، تأکید کردند که دو اقدام اساسی برای کاهش خطر تأخیر، شناخت علل تأخیر و دانستن اهمیت و وزن هر کدام از علل تأخیر است [10].

با توجه به پژوهش‌های فوق، مشخص می‌شود که برخی از علل تأخیر پروژه‌ها بین کشورهای مختلف مشترک هستند و برخی خیر. از نظر عباس‌نژاد و ایزدی دلیل این امر وجود ارتباط نزدیک بین تأخیر و فرهنگ کاری، سبک مدیریت، روش‌های ساخت، شرایط جغرافیایی، ذی‌نفعان، سیاست دولت، وضعیت اقتصادی و در دسترس بودن منابع در یک کشور است؛ این‌ها مفاهیمی هستند که اغلب از کشوری به کشور دیگر متفاوت هستند [7]. اکثریت مطالعات انجام‌شده در زمینه عوامل مؤثر بر تأخیرها، با رویکردهای آماری و مبتنی بر جمع‌آوری نظرات از طریق پرسش‌نامه انجام گرفته است. با وجود اینکه عوامل تأخیر پروژه‌ها در صنعت ساخت‌وساز ایران توسط پژوهشگران مورد بررسی قرار گرفته است، اما جامع بودن عوامل معرفی شده توسط این پژوهش‌ها مورد تردید نویسندگان گزارش حاضر است و به همین دلیل، در این پژوهش در راستای تکمیل‌تر کردن عوامل و پارامترهای مؤثر بر مدت زمان پروژه‌های عمرانی، علاوه بر مطالعات جامع کتابخانه‌ای از مصاحبه نیمه‌ساختار یافته با افراد خبره در حوزه صنعت ساخت‌وساز نیز استفاده شده است که شرح چگونگی آن در روش تحقیق آمده است.

تأخیر افتادن یک پروژه ساخت‌وساز اغلب ناشی از تعامل پیچیده ترکیبی از رویدادها است که برخی از آن‌ها ریسک‌های پیمانکار و برخی دیگر ریسک‌های کارفرمای پروژه هستند. این پژوهشگران گزارش کردند که سطح ضعیف دانش، درک و مهارت‌های مورد نیاز اغلب موانعی را برای اتمام به‌موقع و مطابق با زمان‌بندی یک پروژه ایجاد می‌کنند. موانع دیگر از نظر این پژوهشگران عبارتند از اطلاعات ناکافی پروژه، به‌روزرسانی ضعیف زمان‌بندی‌ها و استفاده از زمان‌بندی‌هایی که بر پایه شبکه-های مبتنی بر روش مسیر بحرانی تهیه نشده‌اند [4]. جی‌سوایس و همکاران [5] در سال ۲۰۰۸ مشکلات اقتصادی پیمانکار، دخالت کارفرما، مدیریت پروژه ضعیف پیمانکار، عدم وجود نیروی کار ماهر و کمبود متخصصان در دستگاه پیمانکار را مهم‌ترین دلایل تأخیر زمان پروژه‌ها در کشور اردن اعلام کرده‌اند [5]. پوررستم و اسماعیل [6] در سال ۲۰۱۲ مهم‌ترین علل تأخیر در پروژه‌های ایران را اولویت‌بندی کردند. عوامل شناسایی شده توسط این پژوهشگران عبارتند از تأخیر در پرداخت به موقع از سوی کارفرما، تغییرات درخواست توسط کارفرما حین اجرا، مدیریت ضعیف کارگاه، مشکلات مالی پیمانکار، تأخیر در بررسی و تأیید اسناد طراحی توسط کارفرما، برنامه‌ریزی و زمان-بندی ناکارآمد توسط پیمانکار، مشکلات و اختلافات در اسناد طراحی و شرایط بد آب‌وهوایی [6].

عباس‌نژاد و ایزدی [7] نیز در سال ۲۰۱۳ عوامل اصلی تأخیر در پروژه‌های ساخت‌وساز ایران را شناسایی کردند که عبارتند از صورت‌های مالی پرداخت‌نشده، تغییرات در محدوده پروژه‌ها و مداخلات کارفرمایان، تحویل پروژه به پیمانکاران ارزان‌تر در فرایند برگزاری مناقصات و مدیریت ضعیف کارگاه ساختمانی توسط پیمانکاران. تمام عوامل تأخیر در تضاد با نیازهای صنعت ساخت‌وساز هستند. یافته‌ها نشان می‌دهد که مهم‌ترین علت تأخیر، فقدان دانش کافی در مورد ماهیت صنعت ساخت‌وساز در میان اعضای درگیر در پروژه‌ها است [7]. در یک مقاله مروری، موکاا و همکاران [8] در سال ۲۰۱۳ تأخیر در پرداخت‌ها به پیمانکار، ضعف مالی پیمانکار، تأخیر در تصویب اسناد، تغییرات عمده در محدوده پروژه، تأخیر در تأمین مواد، خرابی تجهیزات، بهره‌وری پایین کارگران و شرایط بد آب‌وهوایی را به‌عنوان علل اصلی تأخیر در پروژه شناسایی کرده‌اند [8].

پویایی سیستم‌ها و صنعت ساخت‌وساز

اولین کار پژوهشی بر روی کاربرد پویایی سیستم در مدیریت پروژه به‌وسیله لاینیز و همکارانش [11] در سال ۱۹۶۴ انجام شد که در این مورد، مدل پویایی سیستم به‌عنوان ابزاری برای حل تعارض بین نیروی دریایی آمریکا، به‌عنوان کارفرما، و شرکت اینگال، به‌عنوان پیمانکار، استفاده شد. این مدل به‌عنوان ابزار تشخیص برای موشکافی کردن علت انحراف از هزینه و برنامه استفاده شد [11]. رپنینگ [12] در سال ۱۹۹۹ با استفاده از روش شبیه‌سازی پویایی سیستم‌ها به بررسی روند توسعه تعهد کارکنان در پذیرش نوآوری در سازمان و پروژه‌ها پرداخت. وی با مدل کردن این روند و بررسی سیاست‌های مختلف به شناسایی عوامل مهمی چون تعهد کامل مدیران در زمان بین قبول نوآوری تا مشاهده نتایج و عوامل بسیار دیگری پرداخت [12]. هویک [13] در سال ۲۰۰۱ از روش پویایی سیستم‌ها برای پیگیری مواردی همچون بالا رفتن هزینه‌ها، افزایش مدت زمان نسبت به برنامه زمانی پروژه‌ها و بررسی تأثیر تأخیرات و به هم ریختگی‌ها بر ابعاد پروژه استفاده کردند [13].

کریتامارا و همکاران [14] در سال ۲۰۰۲ طی تحقیقی با در نظر گرفتن پنج پروژه بزرگ طراحی و ساخت در تایلند اقدام به مشخص کردن عوامل مهم در ایجاد انحراف زمانی و هزینه‌ای پروژه‌ها از طریق مصاحبه با مدیران پروژه و طراحان کردند. این پژوهشگران همچنین اقدام به ساخت مدل پویایی سیستم از عوامل مهم در ایجاد انحراف زمانی کردند. از محدودیت‌های این پروژه می‌توان به در نظر نگرفتن عواملی چون شرایط اقتصادی و عوامل محیطی در مدل اشاره کرد [14]. لاو و همکاران [15] نیز در سال ۲۰۰۲ به منظور درک تأثیر تغییرات و خطاهای طراحی و ساخت که منجر به دوباره‌کاری‌ها بر سیستم مدیریت پروژه می‌شوند، از روش پویایی سیستم استفاده کردند [15]. در همین سال، بونر و همکاران [16] به بررسی عوامل مرتبط با اشتیاق، تعهد و اتحاد افراد تیم پروژه با ایجاد یک مدل پویایی سیستم پرداختند و این موضوع را روشن ساختند که اشتیاق و تعهد در پروژه‌های ساخت‌وساز در صورتی به وجود می‌آید که همکاری و مشارکت در محیط کار ساخته و پرورانده شود [16]. هویک [17] در سال ۲۰۰۳ در پژوهش خود به‌کارگیری روش پویایی-سیستم برای تجزیه و تحلیل اختلال و تأخیر در پروژه‌های پیچیده را برای دعاوی قضایی مورد بررسی قرار داد و هدف تحقیق را

با در نظر گرفتن اینکه آیا روش پویایی سیستم قادر به برآورده کردن اهداف مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل دعاوی قضایی است یا خیر، دنبال کرد [17].

چنگ و همکاران [18] در سال ۲۰۰۷ تأثیر فشرده‌سازی برنامه زمان‌بندی را بر بهره‌وری نیروی کار صنعت ساخت‌وساز بررسی کردند و مدلی را ارائه دادند که فرایند این تأثیر را نشان دهد [18]. در سال ۲۰۰۹ سبط و همکاران [19] مطالعه‌ای بر روی مدیریت پیوسته تهدیدها و فرصت‌های پروژه با استفاده از روش پویایی سیستم انجام دادند. در این مطالعه با تأکید بر این موضوع که عدم قطعیت در یک پروژه محدود به تهدیدها (جنبه منفی) نیست، به بررسی فرصت‌ها (جنبه مثبت) در کنار تهدیدها به عنوان عدم قطعیت یک پروژه پرداخته شد [19]. دنگریلد و همکاران [20] در سال ۲۰۱۰ اقدام به شناسایی و ایجاد مدلی پویا از عوامل تأثیرگذار بر رقابت در پروژه‌های ساخت کردند. آن‌ها مدل را در چهاربخش اصلی شامل قراردادهای کار در جریان، سرمایه‌گذاری و منابع انسانی تنظیم کردند و به بررسی سیاست‌های گوناگون در زمینه عوامل رقابتی در پروژه‌های ساخت‌وساز با استفاده از روش پویایی سیستم اقدام کردند [20]. مادسلی و آل‌جیوری [21] نیز در سال ۲۰۱۰ تحقیقی در زمینه مشخص کردن عوامل تأثیرگذار بر بهره‌وری پروژه‌های ساخت‌وساز و همچنین چگونگی ارتباط و میزان اهمیت این عوامل با استفاده از روش پویایی سیستم انجام دادند. در نهایت عواملی چون برنامه‌ریزی و کنترل را از عواملی معرفی کردند که ارزش صرف وقت و هزینه در مدیریت پروژه‌های ساخت‌وساز را دارند [21].

وان و همکاران [22] در سال ۲۰۱۲ اقدام به شبیه‌سازی مدلی پویا از دو پروژه ساختمانی در هنگ‌کنگ کرد. از نتایج این تحقیق می‌توان به اهمیت تلاش‌های مدیریتی در زمینه افزایش هماهنگی در مرحله برنامه‌ریزی، مشخص ساختن تصمیمات طراحی برای کارهایی که به هم وابسته‌اند و بهبود شرایط مقدم بر تجهیز کارگاه نام برد [22]. الوانچی و همکاران [23] در سال ۲۰۱۲ در مدل‌های خستگی، پویایی تجدید نظر شده را ایجاد کردند که می‌تواند توسط مدیر پروژه مورد استفاده قرار گیرد. در این تحقیق چهار متغیر اصلی تأثیرگذار از دست دادن بهره‌وری نیروی کار، خستگی ذهنی، جسمی و اضافه‌کاری بررسی شده است [23]. گوی‌یه و همکاران [24] نیز در سال ۲۰۱۲ تحقیقی در زمینه مدیریت ضایعات پروژه‌های ساخت‌وساز انجام داده‌اند، آنان با

شامل استفاده از فناوری‌های کم پسماند و عملکرد مدیریت پسماند در سایت است می‌تواند تا ۲۷/۰۵ درصد پسماند حاصل از ساخت را کاهش دهد [30]. ابوطالب و ال‌ادوای [31] در سال ۲۰۱۸ در پژوهش خود مطرح کردند که برای بهبود تصمیم‌گیری در پروژه‌های ساختمانی، مدل‌های پویا برای درک پویایی پروژه‌های پیچیده طراحی شده‌اند که روش‌های برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری سنتی فاقد آن است. با این حال، هر یک از مدل‌های پویای موجود فقط بر روی پارامترهای محدودی متمرکز می‌شوند که بر چرخه مدیریت پروژه تأثیر می‌گذارند [31]. آن‌ها در پژوهش خود ۲۵ پارامتر پویا را معرفی کردند و بر اساس بررسی‌های خود به این نتیجه رسیدند که، هیچ کدام از مدل‌های پیشنهادشده تا آن سال همه این ۲۵ پارامتر پویا را در بر نگرفته‌اند و حداکثر تعداد پارامترهایی که به طور همزمان مدل‌سازی شده‌اند ۱۸ پارامتر است [31]. این مسئله نیازی جدی به یک مدل SD را ایجاد می‌کند که بتواند حداکثر پارامترهای پویا را برای مدیریت جامع‌تر پروژه‌های ساختمانی ادغام کند.

زین قاضی کفاهی و همکاران [32] در سال ۲۰۲۰ در پژوهش خود بیان کردند که مدل‌سازی پویایی سیستم برای کمی-سازی تأثیر تغییر سفارشات بر بهره‌وری نیروی کار تأثیر به‌سزایی دارد. مدل توسعه‌یافته در این مطالعه با استفاده از یک بسته نرم‌افزاری SD به نام Vensim ساخته شده است [32]. محمدرضایی طیبی و همکاران [33] در سال ۲۰۲۱ مطالعه‌ای در خصوص تخمین کیفیت کار پیمانکاران صنعت ساختمان با استفاده از روش پویایی سیستم انجام دادند. در این مطالعه با استفاده از ایجاد حلقه‌های علیتی ایجاد شده مبتنی بر عوامل مؤثر بر کیفیت کار و نظر متخصصان، کیفیت کار انجام‌شده توسط پیمانکاران فرعی صنعت ساختمان مورد پیش‌بینی قرار گرفته - است [33]. گلشنی‌منش و همکاران [34] نیز در سال ۲۰۲۱ با استفاده از روش پویایی سیستم مطالعه‌ای در خصوص پیش‌بینی توسعه صنعت ساخت‌وساز در ایران انجام دادند. در این مطالعه با استفاده از شاخص‌های توسعه پایدار از جنبه‌های مختلف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی، وضعیت ساخت‌وساز در آینده مورد پیش‌بینی قرار گرفته است [34]. چن ونگ و همکاران [35] در سال ۲۰۲۲ با استفاده از ترکیب روش پویایی سیستم و وزن‌دهی آنتروپی، مدلی برای کنترل ریسک‌های تزریق ملات در ساختمان‌های پیش‌ساخته ارائه دادند. در این رویکرد، از ابزارهای

ارائه مدلی در این زمینه با در نظر گرفتن متغیرهای اصلی که بر عملکرد محیطی ضایعات پروژه‌های ساخت‌وساز تأثیر دارند، اقدام به شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار iThink کردند [24]. وانگ یوجینگ [25] در سال ۲۰۱۲ در پژوهش خود از روش پویایی سیستم در برنامه‌ریزی و کنترل یک پروژه ساختمانی استفاده کردند و معتقدند که ساختار اصولی مبتنی بر توسعه پروژه ساخت‌وساز مدل SD با تمرکز بر جنبه‌های مرز مدل، ساختار مدل پایه، معادلات متغیر، حلقه‌های دوباره‌کاری و حلقه‌های کنترل مشخص می‌شوند [25].

هان و همکاران [26] در سال ۲۰۱۳ یک مدل پویایی سیستم ایجاد کردند تا پویایی و تنوع خطاهای طراحی را که منجر به دوباره‌کاری و اصلاح طراحی می‌شوند، شناسایی کنند [26]. نصیرزاده و نجدهی [27] در همین سال یک مدل SD را برای توصیف تأثیر متغیرهای مختلف بر بهره‌وری نیروی کار طراحی کردند. با استفاده از این مدل، مدیر پروژه می‌تواند تأثیر پاسخ‌های مختلف را برای افزایش بهره‌وری نیروی کار ارزیابی کند [27]. وارهو [28] در سال ۲۰۱۳ یک مدل SD را برای بررسی پیشنهاد قیمت در قراردادهای طراحی - مناقصه - ساخت پروژه‌های ساختمانی ارائه کرد و نشان داد که عوامل مختلف چگونه می‌توانند بر بهره‌وری نیروی کار تأثیر بگذارند. این مدل دارای هر دو متغیر برون‌زا و درون‌زا است. متغیرهای درون‌زا شامل استخدام کارگران، ساعات اضافه‌کاری، میزان تولید خطا، تلاش کلی اعمال شده، کار انجام شده و کارگران اخراج شده و متغیرهای برون‌زا نیز شامل بهره‌وری روزانه کارگر، ساعت تخمین زده شده کار پروژه، شناسایی تغییر دامنه، زمان لازم برای استخدام کارگر، زمان تغییرات و نرخ تخمین پایه کار است [28]. نصیرزاده و همکاران [29] در سال ۲۰۱۳ به مدل‌سازی و شبیه‌سازی مدیریت کیفیت در پروژه‌های ساختمانی با استفاده از روش پویایی سیستم پرداختند. در این پژوهش، ابتدا در چارچوب حلقه‌های علیتی و بازخوردها، تمامی عوامل داخلی و خارجی مؤثر بر مدیریت کیفی یک پروژه تعیین شدند و سپس با استفاده از ترکیب منطق فازی و پویایی سیستم، مدل‌سازی صورت پذیرفت [29].

ژیکوندینگ و همکاران [30] در سال ۲۰۱۶ در تحقیقی با بهره‌گیری از تئوری رفتارهای برنامه‌ریزی شده و پویایی سیستم، منافع زیست‌محیطی مدیریت کاهش پسماند را مورد شبیه‌سازی قرار دادند. نتیجه این شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کاهش منابع که

بازخوردی، متغیرهای کلیدی و رویکردهای مدل‌سازی (مانند بهره‌وری، کیفیت، و ریسک) است که به عنوان علل ریشه‌ای، به صورت غیرمستقیم بر پویایی مدت زمان پروژه‌های ساختمانی تأثیر می‌گذارند. از پیشینه پژوهش فوق نتیجه می‌شود که اگر چه مدل‌های متعددی برای تحلیل عوامل تأخیر یا اثرات BIM بر زمان پروژه با استفاده از پویایی سیستم‌ها ارائه شده است (نظیر مطالعات اخیر در خصوص عوامل ریسک تأخیر با SD و تأثیر BIM بر زمان پروژه در عربستان)، اما تا کنون مدلی جامع ارائه نگردیده است که:

۱. عوامل شناسایی شده در پروژه‌های ایران (که در این پژوهش استفاده شده) را در ساختار SD ادغام کند.
 ۲. ساختار دینامیک‌های علی و معلولی مختص به پروژه ایران را با تمرکز بر حلقه‌های تقویتی و تعادلی تحلیل کند.
 ۳. عوامل مؤثر بر روی زمان پروژه‌ها را به صورت کامل شناسایی کند و به صورت سیستمی و با رویکرد تفکر سیستمی (SD) به تعامل پیچیده تمام عوامل مؤثر بر مدت زمان بپردازد.
- این موارد همان شکاف‌های موجود در تحقیقات پیشین است که منجر به ایجاد احساس نیاز و ایجاد انگیزه در نویسندگان گزارش حاضر برای تحقیق و بررسی بر روی این موضوع گردیده است.

روش تحقیق

هدف این تحقیق شبیه‌سازی مبتنی بر پویایی سیستم مدت زمان پروژه‌های عمرانی است. از منظر روش جمع‌آوری داده، روش پویایی سیستم برای جمع‌آوری داده‌های اولیه و شبیه‌سازی کامپیوتری از روش‌های کیفی استفاده می‌کند و در توصیف روابط بین متغیرها و اعتبارسنجی بعد از انجام شبیه‌سازی از روش‌های کمی بهره می‌برد [40]، بنابراین روش جمع‌آوری داده در تحقیق حاضر روش ترکیبی است. در این پژوهش، برای شناسایی عوامل و پارامترهای مؤثر بر مدت زمان پروژه‌های عمرانی در ابتدا از مطالعات کتابخانه‌ای بهره گرفته شد و پس از آن به منظور تأیید این عوامل و پارامترهای شناسایی شده و شناسایی پارامترهای جدید، با استفاده از روش دلفی مصاحبه‌ای نیمه‌ساختاریافته با پیمانکاران، مهندسان مشاور، کارفرمایان و سایر متخصصان صنعت ساخت‌وساز که با مدیریت زمان پروژه‌ها آشنایی داشتند، صورت گرفت. در این راستا، پرسشنامه‌ای باز - پاسخ در دو

مدل‌سازی مانند نمودارهای حلقه‌های علیتی و نمودار حالت جریان استفاده شد تا تعاملات غیرخطی میان ریسک‌ها تحلیل شود [35].

پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که کاربرد SD همچنان در حال گسترش است. برای مثال، داداشی حاجی و بهنام [36] در سال ۲۰۲۳ چارچوبی تلفیقی از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) و پویایی سیستم‌ها برای ارزیابی شاخص‌های پیشرو ایمنی (SLI) در پروژه‌های ساخت‌وساز ارائه کردند. شاخص‌های پیشرو ایمنی که به طور پیش‌گیرانه وقوع خطرات را پیش‌بینی می‌کنند، ابزار مهمی برای بهبود ایمنی هستند. این چارچوب از مدل پویایی سیستم‌ها برای بررسی روابط علی میان شاخص‌ها و از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان برای تصویری‌سازی داده‌های مکانی - زمانی استفاده می‌کند [36]. ریاض و همکاران [37] در سال ۲۰۲۳ به بررسی عوامل کلیدی در پیاده‌سازی مدیریت کیفیت جامع (TQM) در صنعت ساخت‌وساز با تمرکز بر کشورهای در حال توسعه پرداخته است. با استفاده از رویکرد تفکر سیستمی و مدل‌سازی پویایی سیستم‌ها، این پژوهش پیچیدگی‌ها و روابط علی میان عوامل مؤثر بر مدیریت کیفیت جامع را تحلیل کرده است. در این تحقیق، ابتدا با مروری جامع بر ادبیات، ۲۸ عامل کلیدی شناسایی شد و سپس با استفاده از پرسش‌نامه‌های مقدماتی و تفصیلی، ۱۲ عامل مهم از جمله تعهد مدیریت ارشد، رضایت مشتری، فرهنگ کیفی سازمانی و هزینه‌های اولیه بالا اولویت‌بندی شدند و در نهایت برای تجسم روابط میان این عوامل، نمودارهای حلقه‌های علیتی طراحی و مدل پویایی سیستم توسعه یافتند [37]. الاریحسی و همکاران [38] تأثیر BIM بر زمان پروژه در عربستان سعودی را با استفاده از پویایی سیستم‌ها شبیه‌سازی کرده‌اند و ژائو و همکاران [39] بر عوامل ریسک تأخیر پروژه ساخت‌وساز با مدل SD تمرکز کردند. اگر چه برخی از این مطالعات به تحلیل عوامل مؤثر بر زمان/تأخیر پرداخته‌اند، اما پژوهش حاضر با بهره‌گیری از داده‌های منطقه ایران و تحلیل‌های کیفی دلفی، قصد دارد یک مدل ساختاری جامع‌تر ارائه دهد که تعاملات دینامیکی بین تمامی عوامل مؤثر بر مدت زمان را به صورت یکپارچه، و نه صرفاً متمرکز بر یک جنبه (مانند ریسک یا BIM)، مدل‌سازی کند.

هدف از این مرور جامع، صرفاً محدود به تحقیقات با عنوان «مدت زمان پروژه» نیست، بلکه به دنبال شناسایی ساختارهای

تفکر سیستمی است و ابزاری برای مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده می‌باشد [44]. مدل‌های SD در دسته مدل‌های علت و معلولی دسته‌بندی می‌شوند و با طی دو مرحله مدل‌سازی کیفی و مدل‌سازی کمی تهیه می‌شوند. در مدل‌سازی کیفی SD با کمک حلقه‌های علت و معلولی فرضیه‌های علی در طول تدوین مدل نشان داده می‌شوند تا به این وسیله نمایش ساختار به صورت کامل و جامع امکان‌پذیر شود [45]. در مدل‌سازی کمی با تدوین نمودار حالت جریان، که کامل‌ترین نمودار در مدل‌سازی پویایی سیستم است، ساختار ریز و جزئی جریان سیستم نشان داده می‌شود تا ایجاد و تدوین مدل ریاضی برای شبیه‌سازی تسهیل شود [46]. نمودار حالت جریان بین زیرسیستم‌های فیزیکی و اطلاعاتی تفاوت قائل می‌شود و همچنین انواع مختلف متغیرها و توابع را طبقه‌بندی می‌کند. متغیرهای سطح در نمودار حالت جریان درون چهارضلعی نمایش داده می‌شوند و متغیر نرخ در این نمودار با شیر سوپاپ‌دار نمایش داده می‌شود، زیرا متغیر نرخ تصمیمی است که جریان ورودی و خروجی به نمودار سطح را کنترل می‌کند. سومین نوع متغیرها از نوع کمکی هستند که از لحاظ تئوری اختیاری هستند، اما بر متغیر نرخ تأثیر می‌گذارند و از متغیر سطح تأثیر می‌پذیرند و همچنین بر تأثیرگذاری متغیر نرخ بر متغیر سطح اثرگذار هستند. تعریف متغیرهای نرخ به درک و فهم جزئیات مدل کمک می‌کند [44]. روابط مربوط به متغیرهای سطح و نرخ در حالت پیوسته به صورت روابط (۱) و (۲) و در حالت گسسته به صورت روابط (۳) و (۴) است:

$$\text{level}(t) = \int (\text{inflow}(t) - \text{outflow}(t))dt + \text{level}(0) \quad (1)$$

$$\text{Rate}(t) = \frac{d(\text{level}(t))}{dt} = \text{Netchangein} \quad (2)$$

$$\text{level}(k) = \text{level}(j) + \Delta T(\text{Rate}(jk)) \quad (3)$$

$$\text{Rate}(kl) = \text{Inflow}(k) - \text{outflow}(l) \quad (4)$$

که در این روابط، رابطه (۱) معرف متغیر سطح است که حاصل انباشت متغیر نرخ است. متغیرهای سطح، انباشت و یا تجمیع یک جریان در طول زمان را نشان می‌دهند. متغیرهای سطح را می‌توان در هر نقطه از زمان اندازه‌گیری کرد. رابطه (۲) معرف متغیر نرخ است. متغیرهای نرخ در یک سیستم همان متغیرهای تصمیم هستند که توسط ساختار سیاست‌ها و

بخش سؤالات عمومی و تخصصی طراحی گردید و در اختیار آزمودنی‌های مصاحبه قرار گرفت و فرایند اصلاح پرسشنامه، ارسال مجدد آن به خبرگان و دریافت پاسخ‌ها تا زمان رسیدن به همگرایی در نظرات پیگیری شد. تأثیر ارتباط بین تعداد افراد مصاحبه‌شونده در روش دلفی با دقت و کارآمدی این روش توسط براکهورف [41] و بورجه و مورنیگان [42] بررسی شده است و هیچ کدام ارتباط مناسبی پیدا نکردند. در این پژوهش، به منظور اطمینان از جامعیت دیدگاه‌ها، خبرگان از سه گروه اصلی شاغل در صنعت ساخت‌وساز (پیمانکاران، مهندسان مشاور و کارفرمایان) انتخاب شدند تا تنوع نقش‌ها و تجربیات آنان در نتایج لحاظ گردد. هالوول و گامباتر [43]، با توجه به اینکه در اکثر مطالعات پیشین تعداد افراد شرکت‌کننده در مصاحبه دلفی ۸ تا ۱۶ نفر بوده است، حداقل تعداد ۸ نفر را برای دستیابی به همگرایی آرا و اعتبار نتایج در مصاحبه دلفی مناسب دانستند. از این رو، در پژوهش حاضر، بر اساس معیار کفایت عددی ذکر شده در مطالعات دلفی و به منظور رسیدن به دقت بالا در انجام مصاحبه و همچنین با توجه به تعداد خبرگان در دسترس، ۲۲ نفر خبره به عنوان شرکت‌کننده در مصاحبه دلفی انتخاب شدند و پرسش‌نامه این مصاحبه بین آن‌ها توزیع شد. انتخاب ۲۲ نفر خبره در این پژوهش ضمن رعایت استانداردهای روش‌شناسی، امکان تحلیل عمیق و تشکیل چندین دور نظرخواهی را نیز فراهم کرد. برای دستیابی به یک دیدگاه جامع و متعادل، نمونه خبرگان از نظر نقش و سابقه به دقت طبقه‌بندی شدند. ترکیب خبرگان عبارت بودند از: الف) ۸ نفر از مدیران ارشد پروژه‌های کارفرمایی (شامل نمایندگان سازمان‌های دولتی و خصوصی)، ب) ۷ نفر از مدیران عامل و مدیران فنی شرکت‌های پیمانکاری سطح اول، و ج) ۷ نفر از مدیران فنی و اجرایی دفاتر مهندسی مشاور. همچنین، تمامی خبرگان شرکت‌کننده دارای حداقل ۱۵ سال سابقه فعال در مدیریت پروژه‌های عمرانی و آشنایی با چالش‌های زمان‌بندی بودند. این ترکیب متوازن تضمین می‌کند که عوامل شناسایی شده منعکس‌کننده دیدگاه‌های متفاوت ذی‌نفعان اصلی پروژه باشد.

پس از شناسایی عوامل مؤثر بر مدت زمان پروژه‌های عمرانی، نحوه ارتباط و تأثیر این عوامل بر همدیگر و بر روی مدت زمان یک پروژه با بهره‌گیری از روش پویایی سیستم مدل‌سازی شد و از نرم‌افزار Vensim برای انجام شبیه‌سازی استفاده گردید. پویایی سیستم‌ها یک روش شبیه‌سازی برگرفته از

نتایج و بحث

پس از بررسی پیشینه پژوهش و انجام مصاحبه، ۴۷ پارامتر مؤثر بر مدت زمان پروژه‌های عمرانی شناسایی شدند که ۴۳ تا از آن‌ها از مطالعات کتابخانه‌ای استخراج شدند و به تأیید خبرگان رسیدند و پارامترهای نرخ پیشرفت پروژه، تکمیل چارت سازمانی، سرعت انجام کارها و بازده ماشین‌آلات در مصاحبه نیمه-ساختاریافته اضافه شدند. تمام پارامترهای شناسایی شده از مقالات و مصاحبه در جدول (۱) آورده شده است.

استراتژی‌های سیستم تعیین می‌شوند. متغیرهای نرخ به صورت جریان‌های ورودی و خروجی یک متغیر سطح هستند و بنابراین تصمیمی که در قالب متغیرهای نرخ اتخاذ می‌شود، متغیرهای سطح و یا اطلاعات در مورد سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. متغیرهای نرخ را نمی‌توان در هر لحظه از زمان و به طور آنی اندازه‌گیری کرد و این متغیرها در یک بازه زمانی مشخص قابل اندازه‌گیری هستند. همان طور که گفته شد روابط (۳) و (۴) در حالت گسسته نوشته شده است.

جدول ۱ پارامترهای شناسایی شده از مطالعات کتابخانه‌ای و مصاحبه دلفی

ردیف	عنوان پارامتر	منابع	تعریف
۱	دوباره کاری	[47]	کارهایی که باید به دلیل نقص یا اشتباه قبلی، تکرار یا اصلاح شوند
۲	اضافه کاری	[23]	ساعات کاری فراتر از زمان استاندارد روزانه یا هفتگی پرسنل برای جبران تأخیر یا تسریع کار
۳	خطای اجرایی	[26]	اشتباهات ناشی از اجرای نادرست نقشه‌ها یا دستورالعمل‌ها در حین عملیات ساخت
۴	خطای طراحی	[9]	نقص‌ها یا ابهامات موجود در نقشه‌ها و مشخصات فنی پروژه که پیش از ساخت شناسایی نشده‌اند
۵	خطای ساخت	[49]	مشکلات کیفی در مواد یا فرایند ساخت قطعات پروژه که منجر به نیاز به تعویض یا اصلاح می‌شود
۶	فشارکاری	[25]	شدت نیروی کار تحمیل شده به کارکنان که اغلب منجر به خستگی و کاهش بهره‌وری می‌شود
۷	استخدام	[20]	فرایند تأمین نیروی کار جدید مورد نیاز برای پوشش کمبودها یا افزایش ظرفیت تیم‌ها
۸	نیروی انسانی	[20]	مجموع ظرفیت و تخصص نیروی کاری که به طور فعال در فرایند اجرای پروژه درگیر هستند
۹	بهره‌وری	[51]	میزان خروجی (کار انجام شده) به ازای هر واحد ورودی (زمان، نیروی کار یا هزینه)
۱۰	رضایت	[51]	سطح خشنودی کارکنان از شرایط کاری، مدیریت و محیط پروژه
۱۱	انگیزه	[11]	تمایل درونی و اشتیاق کارکنان برای انجام مؤثر و باکیفیت وظایف محوله
۱۲	خستگی	[25]	کاهش توانایی فیزیکی و ذهنی کارکنان ناشی از کار طولانی یا فشار کاری مداوم
۱۳	شرایط آب و هوایی	[8]	تأثیرات محیطی مانند بارندگی، دما یا باد شدید بر قابلیت اجرای فعالیت‌های خارج از محیط بسته
۱۴	دخالت کارفرما	[5]	اعمال تغییرات غیربرنامه‌ریزی شده یا تصمیمات مدیریتی کارفرما بر روند جاری پروژه
۱۵	تغییر در سفارش‌ها	[53]	اصلاح یا بازنگری در دامنه و جزئیات اولیه کارهای مورد نیاز پروژه توسط سفارش‌دهنده
۱۶	اضافه شدن کارهای جدید	[32]	ورود فعالیت‌ها یا آیتم‌های کاری که در قرارداد اولیه پروژه پیش‌بینی نشده بودند
۱۷	تغییر در روش اجرا	[52]	نیاز به استفاده از تکنیک‌ها یا رویکردهای فنی متفاوت از آنچه اولیه طراحی شده بود
۱۸	تکنولوژی جدید	[7]	استفاده از روش‌ها یا تجهیزات نوین که نیازمند یادگیری و سازگاری تیم اجرایی است
۱۹	تحقیق و توسعه	[54]	فعالیت‌های تخصیص‌یافته برای بهینه‌سازی فرایندها یا حل مشکلات فنی پیچیده در حین پروژه
۲۰	آموزش	[53]	فرایند ارتقای دانش و مهارت‌های پرسنل برای استفاده از تکنولوژی‌های جدید یا بهبود کارایی
۲۱	شناسایی تأمین‌کنندگان	[20]	فرایند یافتن، ارزیابی و انتخاب منابع معتبر برای تأمین مصالح و تجهیزات پروژه
۲۲	جلسات با ذی‌نفعان	[11]	زمان صرف‌شده برای هماهنگی، تصمیم‌گیری و گزارش‌دهی به تمامی طرف‌های ذی‌نفع پروژه
۲۳	مسائل حقوقی، قراردادی	[51]	درگیری‌ها یا ابهامات ناشی از تفسیر قرارداد، ادعاها یا اختلافات قانونی در حین کار
۲۴	تلاش برای رفع مسائل	[8]	زمان و انرژی صرف‌شده توسط مدیریت برای حل مشکلات غیرفنی و اداری (مانند اختلافات)

ردیف	عنوان پارامتر	منابع	تعریف
۲۵	مدت زمان رفع مسائل	[8]	زمانی که یک مسئله (حقوقی، اداری، فنی) پس از شناسایی، صرف رفع نهایی آن می‌شود
۲۶	ایمنی	[28]	سطح رعایت استانداردهای ایمنی در کارگاه که مستقیماً بر حوادث و وقایع کاری اثر می‌گذارد
۲۷	وقایع کاری	[3]	حوادث غیرمترقبه یا پیش‌بینی نشده در محیط کار (مانند حوادث، آتش‌سوزی‌ها یا خرابی‌های بزرگ)
۲۸	برنامه زمان‌بندی	[48]	کیفیت و دقت برنامه زمان‌بندی کلی پروژه و فعالیت‌های جزئی آن
۲۹	نرخ پیشرفت پروژه	*	سرعت تکمیل کارها بر حسب درصد یا واحد فیزیکی در یک دوره زمانی مشخص
۳۰	تکمیل چارت سازمانی	*	میزان کامل بودن ساختار مدیریتی و تخصیص نقش‌ها در تیم پروژه
۳۱	بودجه کل پروژه	[50]	منابع مالی مصوب و تخصیص یافته برای انجام کامل تمام فعالیت‌های پروژه
۳۲	بودجه باقی‌مانده از پروژه	[50]	باقی بودجه مصوب که هنوز برای تکمیل کارهای باقی‌مانده در دسترس است
۳۳	کل پرداختی به پیمانکار	[50]	مجموع مبالغی که تا کنون طبق پیشرفت کار، به پیمانکار اصلی پرداخت شده است
۳۴	سرعت انجام کارها	*	نرخ کلی اجرای فعالیت‌ها، که تحت تأثیر بهره‌وری و منابع است
35	تأخیر در پرداخت حقوق	[6]	مدت زمانی که پرداخت حقوق پرسنل یا دستمزدها به تأخیر می‌افتد
36	تناسب حقوق دریافتی و میزان کار	[51]	ارزیابی منصفانه بودن مبلغ دریافتی کارگران در مقایسه با حجم کار انجام شده توسط آن‌ها
۳۷	مدت زمان نرمال تأخیر در پرداخت حقوق	[8]	متوسط یا زمان پذیرفته شده برای تأخیر در پرداخت‌ها بدون تأثیر منفی جدی بر انگیزه
۳۸	تعداد کل کارهای پروژه	[52]	مجموع فعالیت‌ها یا واحدهای کاری که باید برای تکمیل پروژه انجام شوند (%۱۰۰ کار)
۳۹	تعداد کل کارهای باقی‌مانده	[52]	حجم کاری که هنوز باید انجام شود تا پروژه به اتمام برسد
۴۰	تعداد کل کارهای انجام شده	[52]	حجم کاری که تا کنون تکمیل و تأیید شده است
۴۱	هزینه‌های صرف شده	[3]	مجموع مبالغی که تا تاریخ ارزیابی، صرف فعالیت‌های پروژه شده است
۴۲	تخصیص و تسطیح منابع	[3]	فرایند توزیع بهینه نیروی انسانی و تجهیزات بین فعالیت‌های همزمان برای جلوگیری از گلوگاه
۴۳	تعمیر و نگهداری	[3]	زمان و هزینه صرف شده برای نگهداری، سرویس یا تعمیر ماشین‌آلات و تجهیزات در طول پروژه
۴۴	تعداد ماشین‌آلات	[9]	کمیت کلی تجهیزات سنگین و سبک موجود در اختیار تیم اجرایی
۴۵	دسترسی به ماشین‌آلات	[28]	سهولت و سرعت دسترسی تیم اجرایی به تجهیزات مورد نیاز در زمان مناسب
۴۶	اندازه فضای کاری	[27]	مساحت فیزیکی موجود در سایت که بر تراکم فعالیت‌ها و سهولت جابه‌جایی تأثیر می‌گذارد
۴۷	بازده ماشین‌آلات	*	کارایی عملیاتی هر دستگاه (میزان کار مفید در واحد زمان کارکرد)
مواردی که با * مشخص شده‌اند مربوط به «استخراج از مصاحبه نیمه‌ساختاریافته» می‌باشند.			

نمودار حالت جریان رسم گردید و با استفاده از داده‌های مطالعه موردی، که در ادامه ذکر می‌شود، مدل‌سازی صورت گرفت. در نهایت، پس از تأیید مدل و اطمینان از صحت مدل، چهار سناریوی مختلف در جهت مدیریت بهتر پروژه تدبیر و مورد بحث قرار گرفت. در ادامه نتایج به دست آمده از مدل‌سازی کیفی، نمودار حالت جریان، اعتبارسنجی و سناریوپردازی ارائه شده و بر روی آن‌ها بحث می‌شود.

حلقه‌های علت و معلولی

نمودار علت و معلولی ابزاری قوی و کارا برای نشان دادن ساختار بازخوردی سیستم‌ها و چگونگی ارتباط و تعامل عوامل بر

هر یک از ۴۷ پارامتر شناسایی شده، نماینده یک بعد منحصر به فرد از دینامیک پروژه در محیط ایران هستند. اگر چه برخی از آن‌ها در نگاه اول مشابه به نظر می‌رسند (مانند «مسائل حقوقی، قراردادی» و «اختلاف داوری»)، تفکیک آن‌ها برای مدل‌سازی دقیق، به ویژه در مرحله اعتبارسنجی کیفی با خبرگان، ضروری تشخیص داده شد. در مدل‌سازی حالت - جریان، تأثیر این متغیرها بر یکدیگر (به ویژه در حوزه مالی و مدیریتی) به صورت تعاملی و پویا پیاده‌سازی شده است.

مطابق روش تحقیق، بعد از شناسایی دقیق پارامترهای مؤثر بر زمان پروژه‌ها و تعیین مرز سیستم، رسم حلقه‌های علت و معلولی آغاز شد. سپس، در محیط نرم‌افزار Vensim نسخه PLE

یکدیگر می‌باشد. گام اصلی مدل‌سازی با روش SD، کشف و معرفی فرایندهای بازخوردی است. حلقه‌های علت و معلولی مقدمه‌ای جامع، مفهومی و مدلی عمومی و ذهنی است که موجب درک بهتر روابط و تسهیل رسم نمودار حالت جریان می‌شود [55].

در مدل پیشنهادی این پژوهش شش حلقه اصلی وجود دارد که هر کدام از آن‌ها به تأیید افراد متخصص حوزه ساخت‌وساز رسیده است. حلقه‌های بزرگ‌تر شامل چندین حلقه کوچک‌تر هستند. بدین ترتیب سعی شده است تا حد ممکن ارتباط و بازخورد تمام عوامل مهم و تأثیرگذار بر مدت زمان پروژه‌های عمرانی کشف و بررسی شود، که در ادامه همه این حلقه‌های علت و معلولی توضیح داده می‌شوند.

حلقه شماره یک: رابطه بین کل کارهای انجामी، کارهای انجام‌شده و حلقه دوباره‌کاری

همان‌طور که در شکل (۱) مشخص است بهره‌وری بر نرخ انجام کارهای اشتباه تأثیرگذار است و خطاهای طراحی و خطاهای ساخت نیز منجر به افزایش خطا و اشتباهات اجرایی می‌شوند. بر اساس مدل بنیادی و ابتدایی حلقه دوباره‌کاری کوپر «خطاهای کشف‌شده» منجر به افزایش «دوباره‌کاری‌های کشف‌نشده» می‌گردند که به مرور بر اساس «نرخ شناسایی دوباره‌کاری» بر میزان کارهای باقی‌مانده می‌افزاید. دخالت کارفرما و تغییر در سفارش‌ها نیز منجر به اضافه شدن کارهای جدید می‌شوند که این کارهای جدید نیز به نوبه خود منجر به افزایش کارهای باقی‌مانده می‌شوند. با افزایش کارهای باقی‌مانده در اثر افزایش خطا، دوباره‌کاری‌های شناسایی‌شده و دخالت کارفرما، نیاز به تخصیص و تسطیح منابع بیشتر می‌شود که در نتیجه آن دسترسی موجودی تجهیزات و ماشین‌آلات کاسته می‌شود و این امر منجر به کاهش تعداد انجام کارهای درست و افزایش کارهای باقی‌مانده می‌شود. حلقه اصلی شماره یک سه حلقه کوچک‌تر را در بر گرفته است که دو تا از آن‌ها حلقه‌های مثبت (تقویت‌شونده) و یکی از آن‌ها حلقه منفی (تعادلی) است.

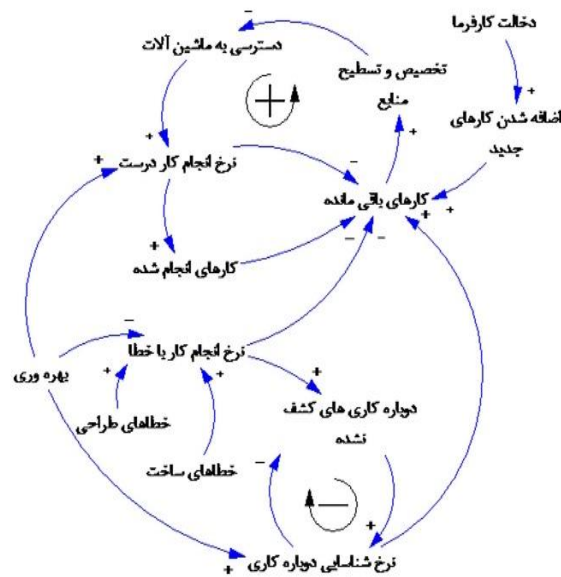
حلقه شماره دو: حلقه تأثیر نیروی انسانی بر روی پیشرفت پروژه و دوباره‌کاری

همان‌طور که در شکل (۲) مشخص است، اگر پیش‌بینی از تأخیر اتمام پروژه بیشتر باشد، اضافه‌کاری پرسنل، فشارکاری و

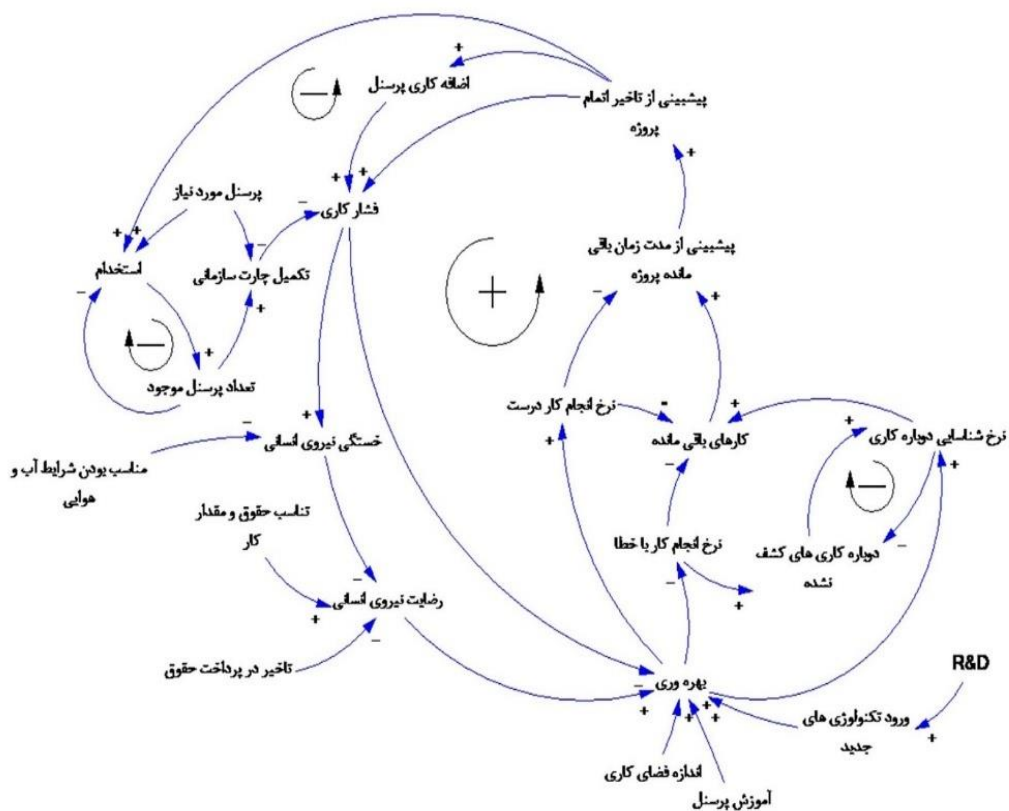
نیاز به استخدام بیشتر می‌شود. استخدام با توجه به تعداد پرسنل موجود و پرسنل مورد نیاز تعیین می‌شود، که هر چقدر اختلاف این دو عدد کم‌تر باشد چارت سازمانی کامل‌تر است و از فشار کاری کاسته می‌گردد. فشار کاری با خستگی رابطه مستقیم و با رضایت کارکنان رابطه عکس دارد. لازم به ذکر است که، تناسب حقوق پرداختی با مقدار کار و تأخیر در پرداخت حقوق نیز در میزان رضایت تأثیرگذار است. تأخیر طولانی در پرداخت حقوق (پارامتر ۳۵)، خود می‌تواند عاملی تشدیدکننده برای ظهور و افزایش سطح «مسائل حقوقی، قراردادی و اداری» (پارامتر ۲۳) باشد و این افزایش، متعاقباً بر بهره‌وری از طریق افزایش جلسات ذی‌نفعان (حلقه ۳) تأثیر می‌گذارد. رضایت کارکنان، شرایط آب و هوایی، توجه به بخش تحقیق و توسعه، ورود تکنولوژی جدید، آموزش پرسنل و اندازه فضای کاری بر میزان بهره‌وری کارکنان اثر دارد. با افزایش بهره‌وری نرخ انجام کارهای صحیح بالا می‌رود و از تعداد کارهای باقی‌مانده کاسته می‌شود که در نتیجه زمان پیش‌بینی از تأخیر اتمام پروژه کم می‌شود.

حلقه شماره سه: حلقه تأثیرگذاری رفع مسائل حقوقی، قراردادی و اداری، جلسات با ذی‌نفعان و شناسایی تأمین‌کنندگان بر پیشرفت پروژه

همان‌طور که از شکل (۳) مشخص است کارهای باقی‌مانده - ی بیشتر منتج به تشکیل جلسات بیشتری با ذی‌نفعان می‌شود و بدین ترتیب مسائل حقوقی، قراردادی و اداری (پارامتر ۲۳) بیشتری ایجاد می‌گردد که ممکن است بروکراسی موجود موجب شود تا مدت زمانی از پروژه صرف امور حقوقی، قراردادی و اداری گردد. توجه شود که اختلافات دآوری (به عنوان یکی از انواع پیچیده مسائل حقوقی) نیز در این متغیر سطح لحاظ شده است و مستقیماً نرخ انجام کار درست را کاهش می‌دهد. از طرفی باید مدیران برای رفع مسائل حقوقی، قراردادی و اداری تلاش کنند تا موجب رفع مسائل شوند. همچنین، وجود سطح بالای مسائل حقوقی، روند تأیید پیشرفت کارها را مختل می‌کند و به طور مستقیم بر «تأخیر در پرداخت حقوق» تأثیر معکوس می‌گذارد. بنابراین، این فرایند سبب می‌شود که نرخ انجام کار درست کم‌تر شود و به تعداد کارهای باقی‌مانده موجود اضافه گردد. شناسایی تأمین‌کنندگان نیز همچون جلسه با ذی‌نفعان همین مشکل را ایجاد خواهد کرد.



شکل ۱ رابطه بین کل کارهای انجامی، کارهای انجام شده و حلقه دوباره کاری



شکل ۲ حلقه علت و معلولی تأثیر نیروی انسانی بر روی پیشرفت پروژه و دوباره کاری

حلقه شماره چهار: حلقه تأثیرگذاری تعداد ماشین آلات بر پیشرفت پروژه همان طور که در شکل (۴) مشخص است هر چه قدر کارهای باقی مانده افزایش یابد موجب استفاده بیشتر از ماشین آلات می شود و به تبع آن امور مربوط به تعمیر و نگهداری افزایش می یابد و سبب افزایش کارهای جدید می گردد که در نهایت به کارهای

پیشرفت پروژه همان طور که در شکل (۴) مشخص است هر چه قدر کارهای باقی مانده افزایش یابد موجب استفاده بیشتر از ماشین آلات می شود و به تبع آن امور مربوط به تعمیر و نگهداری افزایش می یابد و سبب افزایش کارهای جدید می گردد که در نهایت به کارهای

استخدام، اضافه شدن کارهای جدید، نرخ کشف دوباره‌کاری، نرخ تکمیل کارهای اشتباه، نرخ تکمیل کارهای درست و نرخ پرداختی به پیمانکار از جمله متغیرهای نرخ نمودار حالت جریان هستند.

اعتبارسنجی

مدلی مفید است که تا حد ممکن پارامترهای تأثیرگذار در مسئله را در خود جای دهد و ارتباط و نوع علیت را تعیین کند و همچنین رفتارهای بازخوردی را در نظر بگیرد. البته هیچ مدلی نمی‌تواند عیناً آینده را پیش‌بینی کند، در نتیجه باید با استفاده از یک یا چند روش، اعتبار و درستی مدل را مورد سنجش و بررسی قرار داد [56]. پس از اینکه نمودار حالت جریان ایجاد شد و شبیه‌سازی سیستم به درستی در نرم‌افزار Vensim انجام گرفت، لازم است پیش از انجام تحلیل و سناریوپردازی، اعتبار مدل سنجیده شود. به منظور شبیه‌سازی مدل از اطلاعات یک پروژه تجاری - اداری واقع در استان تهران، شهر تهران، خیابان میرداماد استفاده شده است، که در زمینی به مترها ۱۰۰۰ متر مربع واقع شده است و ۱۹۰۰۰ متر مربع مجموع زیربنای طبقات است. این پروژه دارای مجموعاً ۲۴ طبقه است و نرخ پیشرفت متوسط ماهیانه آن ۳/۵ درصد است. تعداد ماشین‌آلات و تجهیزات این پروژه ۱۳ دستگاه سبک و سنگین و تجهیزات بالابر می‌باشد و تعداد کل فعالیت‌های پروژه ۸۵۰ فعالیت است. استفاده از داده‌های تاریخی پروژه‌ها در مدل‌های SD عموماً با هدف بازسازی رفتار مرجع انجام می‌شود و نه تعمیم آماری، از این رو حجم داده‌های واقعی حاصل از یک پروژه تجاری - اداری در شهر تهران متناسب با اصول روش پویایی سیستم است. در عین حال، تعمیم مدل به چند پروژه واقعی در آینده می‌تواند دقت مدل را باز هم افزایش دهد.

باقی‌مانده افزوده می‌شود. از طرف دیگر دخالت کارفرما در اکثر مواقع موجب تغییر در روش اجرا می‌شود که سبب اضافه شدن کارهای جدید می‌شود.

حلقه شماره پنج: حلقه تأثیرگذاری وقایع کاری بر پیشرفت

پروژه

همان‌طور که در شکل (۵) قابل مشاهده است هر چقدر کارهای باقی‌مانده افزایش یابد، فشار بر منابع (انسانی و تجهیزات) تشدید می‌شود و این امر منجر به کاهش رعایت پروتکل‌های ایمنی و بروز وقایع و حوادث کاری خواهد شد و به دنبال آن مسائل حقوقی، قراردادی و اداری ایجاد می‌شود که باعث می‌شود کارهای درست با نرخ آهسته‌تری انجام شود و سبب افزایش کارهای باقی‌مانده و شدت کار می‌شود.

حلقه شماره شش: حلقه تأثیرگذاری پرداختی به پیمانکار بر

پیشرفت پروژه

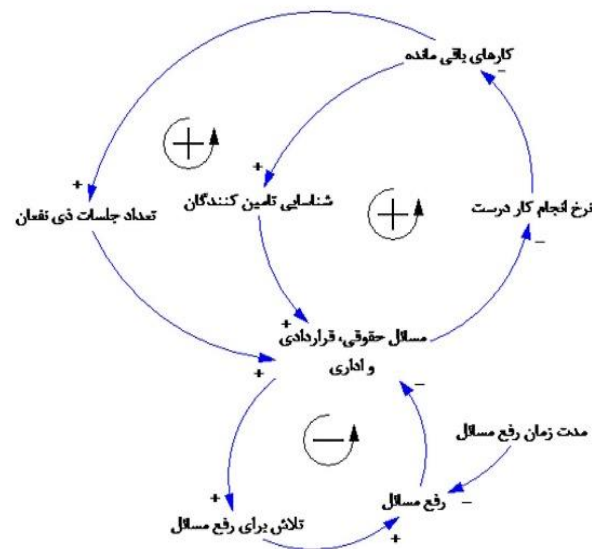
نرخ پیشرفت کار بر اساس کارهای انجام شده و کل کارهای پروژه تعیین می‌شود و کل پرداختی به پیمانکار بر اساس نرخ پیشرفت کار و بودجه پروژه تعیین می‌شود. تغییر روش اجرا بر بودجه پروژه نیز اثرگذار است. اگر پرداختی به پیمانکار بیشتر باشد در واقع از میزان تأخیر در پرداخت حقوق کم می‌شود و سبب افزایش انگیزه، بهره‌وری، نرخ انجام کار درست و نرخ پیشرفت کار می‌شود. حلقه شماره شش در شکل (۶) مشخص شده است.

حلقه علت و معلولی کلی و جامع که از تجمیع شش حلقه

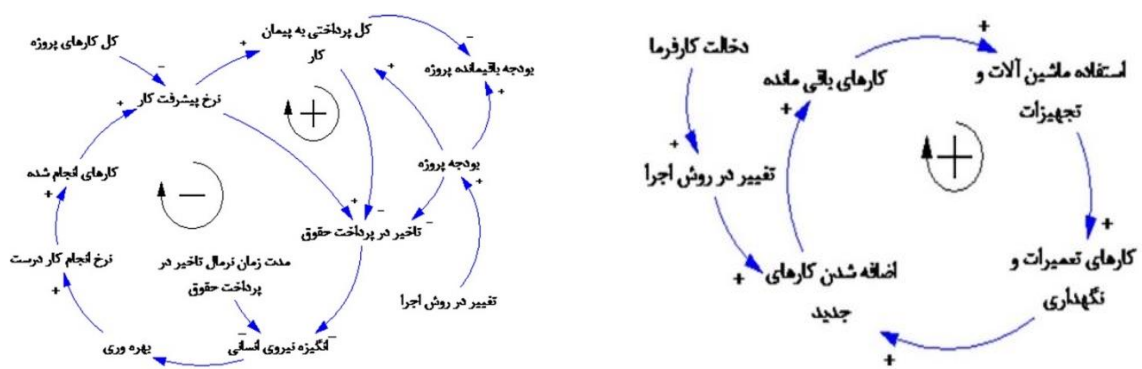
و روابط بین آن‌ها شکل گرفته است در شکل (۷) نشان داده شده است.

مدل‌سازی و نمودار حالت جریان

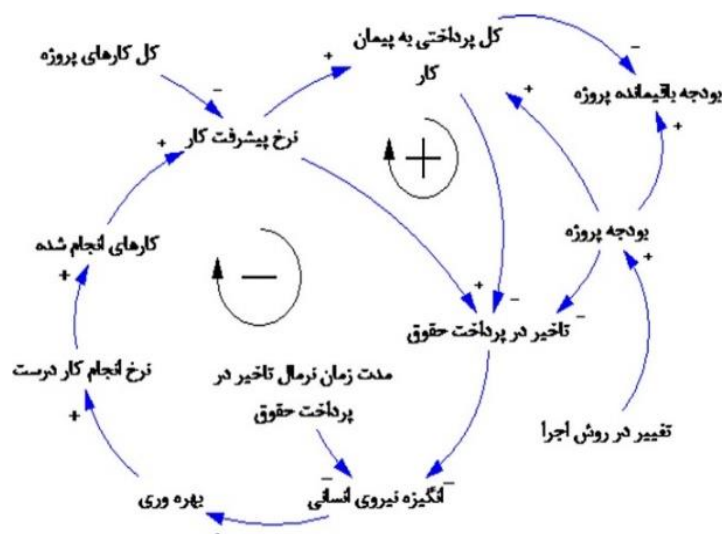
با وجود اینکه نمودارهای علت و معلولی رفتار، بازخورد و ارتباط بین متغیرها را به خوبی نشان می‌دهند، ولی ابزار مناسبی برای مدل‌سازی رایانه‌ای نیستند که در نتیجه باید به نمودار حالت جریان تبدیل شوند. در شکل (۸) که نمودار حالت جریان مسئله تحقیق توسط نرم‌افزار Vensim رسم شده است، متغیرهای تعداد کارگران موجود، کارهای باقی‌مانده، دوباره‌کاری‌های کشف‌نشده، منابع مالی باقی‌مانده پیمانکار، کل پرداختی به پیمانکار، هزینه‌های اضافی و مسائل حقوقی، قراردادی و اداری متغیرهای سطح هستند و حاصل انباشت و تجمع متغیرهای نرخ هستند. متغیرهایی نظیر



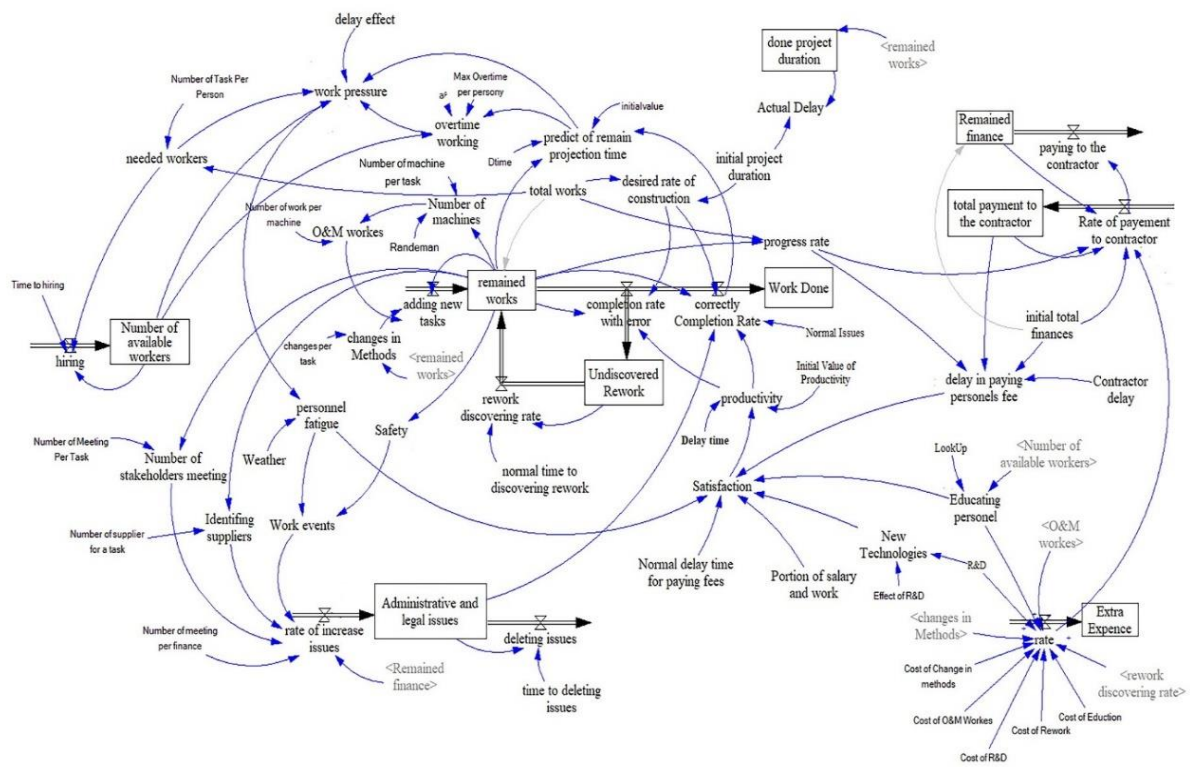
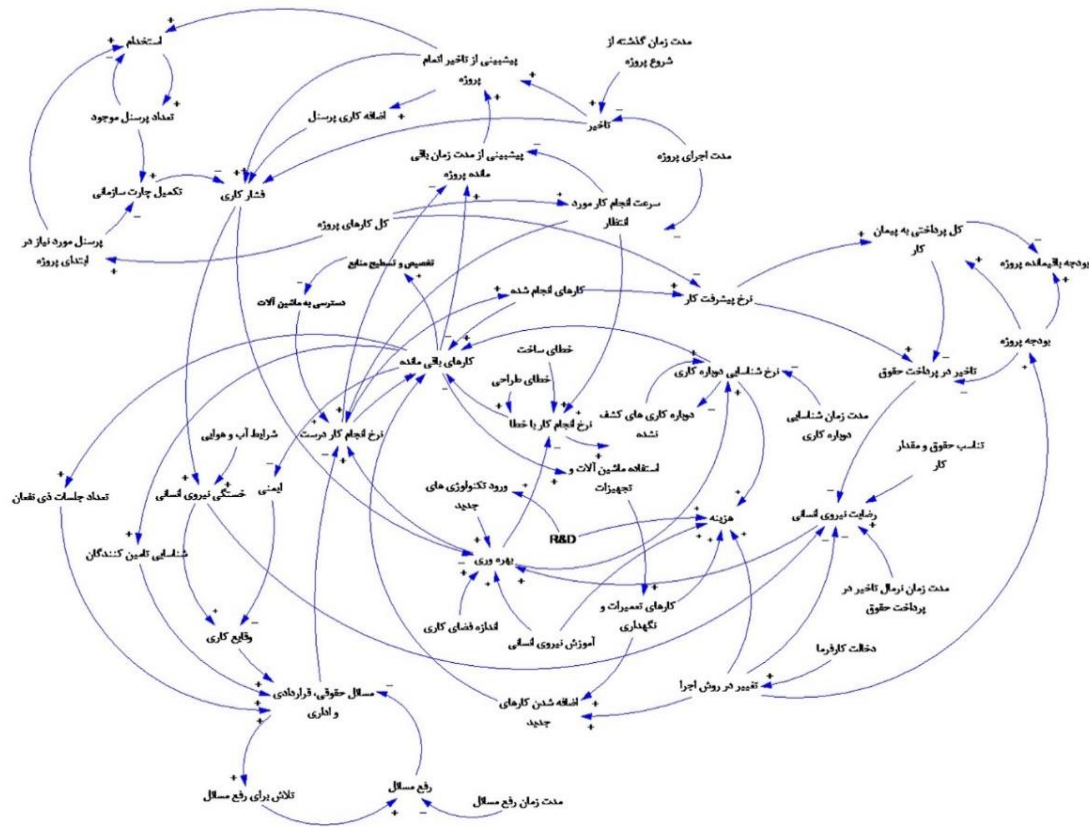
شکل ۳ حلقه تأثیرگذاری رفع مسائل حقوقی، قراردادی و اداری، جلسات با ذی نفعان و شناسایی تأمین کنندگان بر پیشرفت پروژه

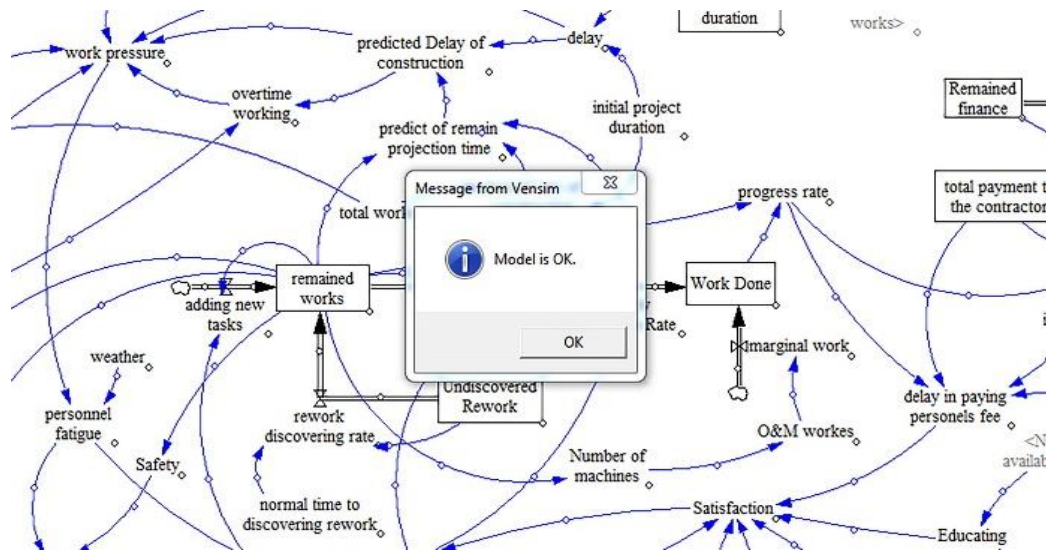


شکل ۴ حلقه تأثیرگذاری تعداد ماشین آلات بر پیشرفت پروژه

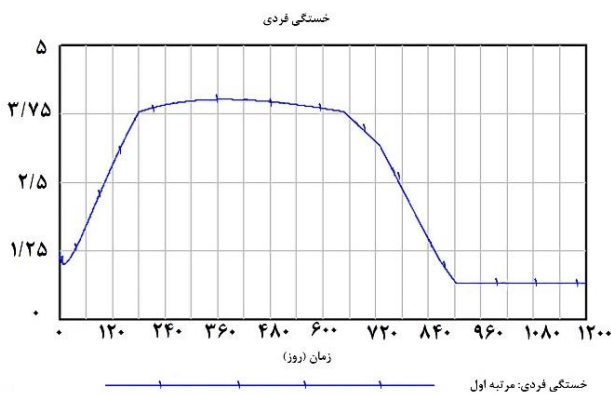


شکل ۵ حلقه تأثیرگذاری پرداختی به پیمانکار بر پیشرفت پروژه

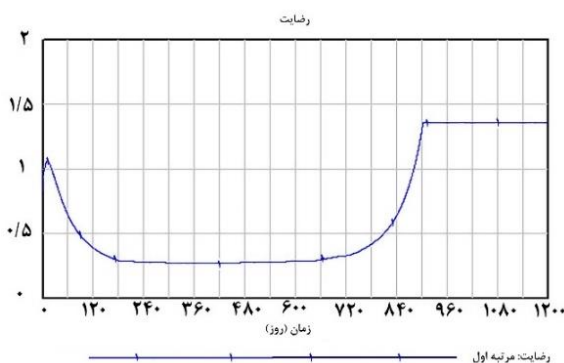




شکل ۹ آزمون ارزیابی ساختار



شکل ۱۰ آزمون رفتار ساختاری خستگی فردی



شکل ۱۱ آزمون رفتار ساختاری رضایت

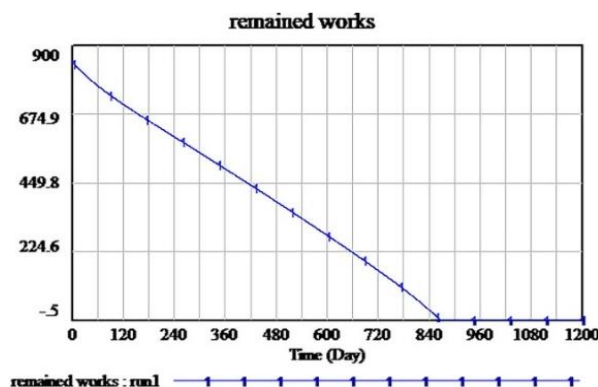
در این پژوهش با آزمون ارزیابی ساختاری و آزمون رفتار ساختاری، آزمون حد نهایی و آزمون بازسازی رفتار مرجع صحت مدل بررسی شده است. شکل (۹) صحت و اعتبار مدل را بر اساس آزمون ارزیابی ساختاری نشان می‌دهد، هدف از این آزمون بررسی تطابق ساختار مدل با دانش توصیفی مربوط به سیستم مدل‌سازی است. در این تحقیق با توجه به اینکه بخش اعظمی از متغیرها، حلقه‌ها و روابط بر اساس مطالعات پیشین تدوین شده است، از نظر ساختاری مورد تأیید است.

شکل‌های (۱۰) و (۱۱) صحت و اعتبار مدل را بر اساس آزمون رفتار ساختاری نشان می‌دهد، نتایج شبیه‌سازی مدل با مقادیر اولیه مربوطه برای متغیرهای گوناگون، رفتاری متناظر با رفتار مورد انتظار آن متغیرها را نشان می‌دهد. به عنوان مثال، انتظار می‌رفت در اواسط پروژه برای کارکنان خستگی بیشتری نسبت به زمان‌های ابتدایی شروع پروژه باشد که نتایج مدل نیز منطبق بر این واقعیت است. شکل (۱۰) نتایج آزمون رفتار ساختاری را نشان می‌دهد.

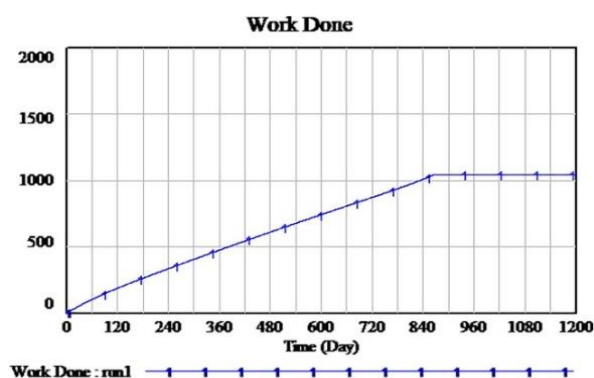
در خصوص متغیر رضایت کارکنان نیز می‌بایست رفتار آن با میزان خستگی پرسنل رابطه عکس داشته باشد که نتایج مدل نیز گویای همین موضوع است. شکل (۱۱) نتایج آزمون رفتار ساختاری را نشان می‌دهد.

شکل (۱۲) صحت و اعتبار مدل را بر اساس آزمون حد نهایی نشان می‌دهد در این آزمون مقدار ورودی‌های مدل مقدار

از ۱٪ خطا) به محققان اطمینان می‌دهد که مدل توسعه‌یافته، علت و معلول‌های کلیدی مؤثر بر مدت زمان پروژه‌های عمرانی را به درستی درونی‌سازی می‌کند و می‌تواند به عنوان مبنایی قابل اعتماد برای تحلیل سناریوهای مدیریتی آتی مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱۳ آزمون بازسازی رفتار مرجع



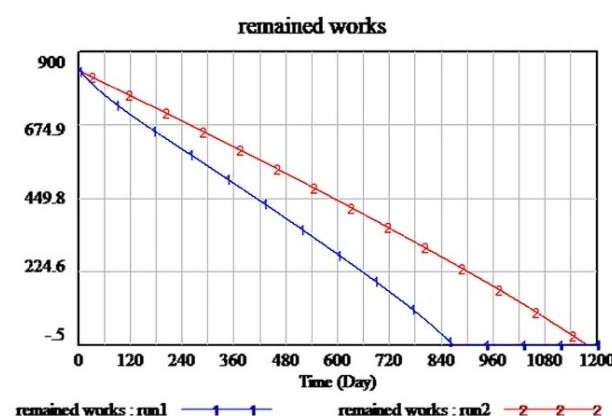
شکل ۱۴ آزمون بازسازی رفتار مرجع

در طول این تحقیق باید این فرض مهم را مد نظر داشت که مقادیر سیستم در حد قابل ملاحظه‌ای طی تعاملات با یکدیگر مقدارشان تعیین می‌شوند و این همان اصول حاکم بر تفکر سیستمی و اساس و شالوده روش پویایی سیستم‌ها می‌باشد.

سناریوپردازی

در بررسی سیاست‌های مختلف و سناریوپردازی این نکته بررسی می‌شود که متغیرهای برون‌زا چه تأثیری بر روی پیشرفت پروژه خواهند گذاشت. در این پژوهش چهار سناریوی زیر مورد بررسی قرار گرفتند:

حدی خود را گرفته و اثر آن بر روی متغیرهای مدل مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدل پویایی سیستم ارائه‌شده از نظر این آزمون نیز مورد تأیید است. به عنوان مثال در صورتی که مقدار پارامتر مناسب بودن شرایط آب و هوایی که یک عدد نسبی بین صفر و ۱ است، برابر با یک عدد کوچک مانند ۰/۱ قرار گیرد نتایج زیر حاصل می‌شود که از نظر منطقی نیز صحیح است. به عنوان مثال، با این تغییر مدت اتمام کارها از ۸۴۵ روز به عدد ۱۲۰۰ روز خواهد رسید. شکل (۱۲) نتایج آزمون حد نهایی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲ آزمون حد نهایی

شکل‌های (۱۳) و (۱۴) صحت و اعتبار مدل را بر اساس آزمون بازسازی رفتار مرجع نشان می‌دهد. در این آزمون مدل باید بتواند رفتار داده‌های تاریخی مربوط به متغیرها را به صورت مناسب بازسازی کند. اعتبار مدل پیشنهادی از نظر این آزمون نیز مورد تأیید قرار گرفت. به عنوان نمونه، در سناریوی شرایط جاری، مدل مدت زمان اتمام پروژه را ۸۴۵ روز پیش‌بینی می‌کند. از آنجا که پروژه مطالعه موردی مورد استفاده، ۲ سال و ۴ ماه به طول انجامیده است (که معادل تقریباً ۸۵۰ روز است)، نتایج شبیه‌سازی با اختلاف تنها ۰/۵۸٪ با داده‌های تاریخی همخوانی دارد. این تطابق قوی، صحت ساختار مدل در بازسازی رفتار واقعی پروژه را تأیید می‌کند. در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نتایج سازگاری مدل با آزمون بازسازی رفتار مرجع نشان داده شده است.

برخلاف آزمون‌های رفتاری که صحت ساختار مدل را می‌سنجند، مقایسه نتایج مدل در سناریوی جاری (۸۴۵ روز) با عملکرد واقعی پروژه مطالعه موردی (۸۵۰ روز)، قوی‌ترین شواهد اعتبارسنجی را فراهم می‌آورد. این دقت بسیار بالا (کمتر

در این سناریو فرض شد که مناسب بودن شرایط آب و هوایی، که در شرایط جاری حالت خیلی مناسب برای این پارامتر در نظر گرفته شده است، به حالت متوسط تغییر یابد و سایر متغیرهای مدل همانند سناریوی شرایط جاری باشند. لازم به ذکر است شرایط آب و هوایی با توجه به طیف لیکرت به ۵ بازه تقسیم بندی شده است. نتایج تغییرات تحت عنوان مرتبه چهارم در شکل های (۱۵ - الف تا و) آورده شده است. لازم به ذکر است، این چهار سناریوی استراتژیک انتخاب شده برای اعتبارسنجی پویایی مدل مهم ترین روابط علی شناسایی شده در مدل را از جنبه های مدیریتی (سناریوی ۳)، منابع انسانی و مالی (سناریوی ۲)، و محیطی (سناریوی ۴) نیز تحت تأثیر قرار می دهند. این سناریوها به گونه ای طراحی شدند که عدم پایداری های اصلی پروژه را شبیه سازی کنند، در نتیجه تحلیل های مدیریت ریسک مالی و طراحی به طور غیرمستقیم در رفتار سناریوهای موجود منعکس شده است.

همان طور که از نتایج بررسی سناریوها حاصل گردید اگر بتوان دخالت کارفرما که عمدتاً موجب تغییر در سفارش ها و تغییر در روش اجرا می گردد را به حداقل رساند، نرخ پیشرفت پروژه ها سریع تر خواهد شد. همچنین، پیمانکاران به دلیل عدم آگاهی در مورد مهارت فعالیت های پروژه معمولاً توجه کمی به آموزش دارند. همان طور که در نتایج بررسی سناریوهای مختلف مشاهده شد، توجه به آموزش پرسنل در روند بهبود وضعیت موجود تأثیر به سزایی خواهد داشت. بنابراین علل بروز بسیاری از مشکلات عدم آشنایی عوامل دخیل در پروژه با ماهیت صنعت ساخت و ساز می باشد که برای از میان برداشتن این مشکل باید به آموزش مدیران ارشد شرکت ها و سازمان های پیمانکار و کارفرما توجه ویژه کرد. برای عملی شدن این مهم باید نهاد یا سازمانی که دارای ضمانت اجرایی است متولی آموزش شود. علاوه بر این، تحلیل های تکمیلی ساختار مدل نشان داد که دینامیک های پیچیده مانند وابستگی متقابل بین تأخیر پرداخت ها و مسائل حقوقی / داوری، و همچنین رابطه بین خطاهای کشف شده و نشده، به طور مؤثر از طریق حلقه های بازخورد متعدد در مدل SD لحاظ شده است و اعتبار کیفی مدل را تقویت می کند. این پژوهش با رویکرد پویایی سیستم، مدلی تحلیلی برای شناخت عوامل مؤثر بر مدت زمان پروژه های عمرانی در ایران ارائه می دهد.

سناریوی اول: به عنوان سناریوی اول، شرایط جاری عواملی از قبیل دوباره کاری کشف نشده، کارهای باقی مانده و نرخ پیشرفت در شرایط فعلی مدل اصلی بررسی شدند که رفتار متغیرهای کلیدی مدل پس از شبیه سازی تحت عنوان مرتبه اول در شکل های (۱۵ - الف تا و) نشان داده شده است.

سناریوی دوم: سناریوی اثر بررسی سخت گیری بر روی پرسنل

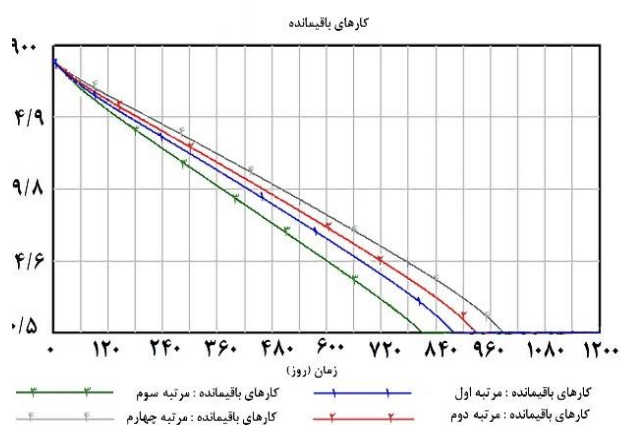
با توجه به این اصل که آموزش، توجه به بخش تحقیق و توسعه، تناسب حقوق کارکنان با توجه به مقدار کار آن ها و تأخیر پیمانکار در پرداخت حقوق کارکنان تأثیر به سزایی در میزان رضایت، انگیزه و بهره وری خواهد داشت، در سناریوی دوم فرض شد که متغیرهای تأخیر کارفرما در پرداخت حقوق (به معنی تأخیر در تسویه حساب با پیمانکار که این متغیر، تأثیر مستقیم بر جریان نقدینگی پیمانکار و در نتیجه، بر توانایی وی در پرداخت حقوق کارکنان خواهد داشت)، تحقیق و توسعه، آموزش پرسنل، نسبت حقوق به مقدار کار مطابق با جدول (۲) تغییر کند. نتیجه این تغییرات با وضعیت جاری سناریوی اول بر رفتار متغیرهای کلیدی تحت عنوان مرتبه دوم در شکل های (۱۵ - الف تا و) نشان داده شده است.

جدول ۲ جزئیات سناریوی دوم

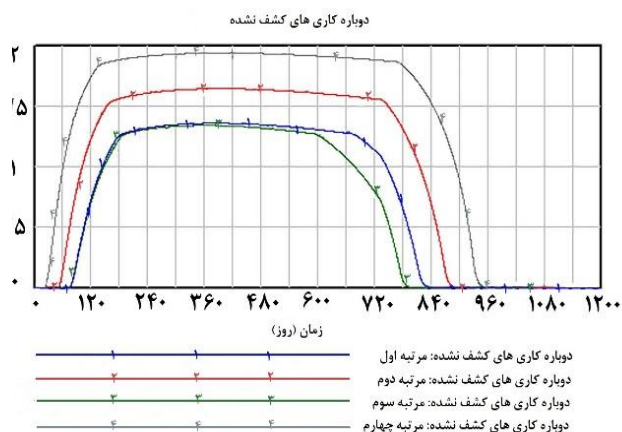
متغیر	میزان تغییر
تأخیر کارفرما در پرداخت حقوق	از صفر به ۶۰ روز افزایش یابد
تحقیق و توسعه	۲۰ درصد کاهش یابد
آموزش پرسنل	۲۰ درصد کاهش یابد
نسبت حقوق به مقدار کار	۱۰ درصد کاهش یابد

سناریوی سوم: تأثیر عدم تغییر روش اجرا توسط کارفرما در سناریوی سوم فرض شد که تمامی متغیرها مطابق با سناریوی شرایط جاری باشند. تنها تغییری که در سناریوی سوم اعمال شد حذف تغییر روش اجرا است. نتایج این تغییر تحت عنوان مرتبه سوم در شکل های (۱۵ - الف تا و) آورده شده است. همان طور که از نتایج واضح است با اعمال این تغییر بر روی مدل بهترین شرایط برای اتمام پروژه ایجاد شده است.

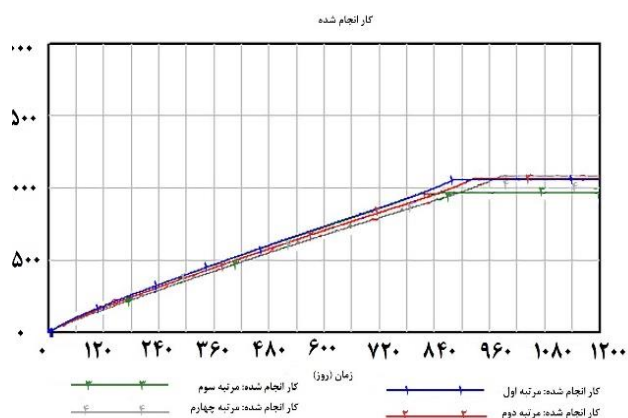
سناریوی چهارم: تأثیر شرایط آب و هوایی بر روی اجرای پروژه



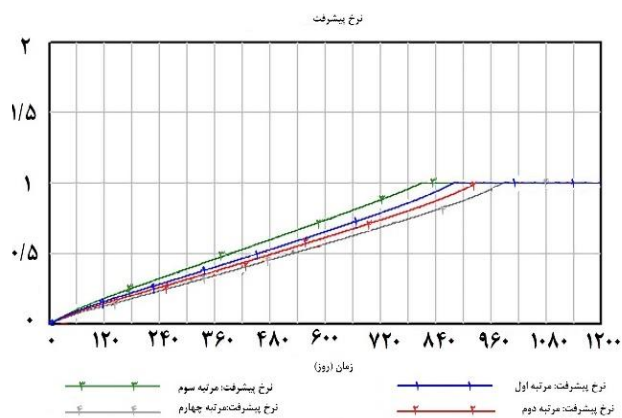
(ب)



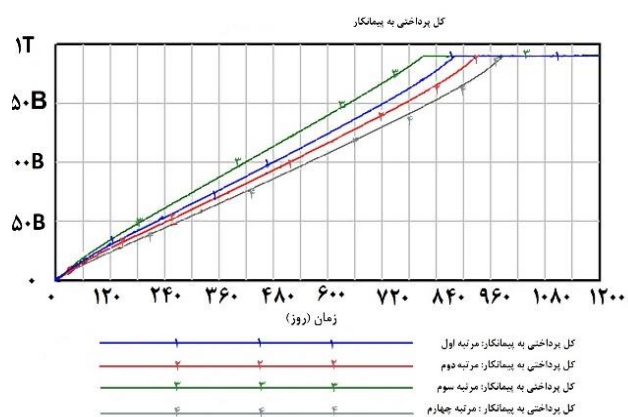
(الف)



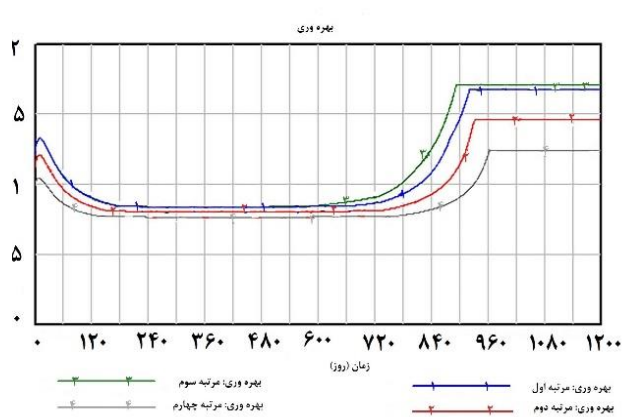
(د)



(ج)



(و)



(ه)

شکل ۱۵ نتایج چهار سناریو

مطرح است. با این وجود تأخیر در اجرا و بهره‌برداری یکی از مشکلات و چالش‌های رایج پروژه‌های ساخت‌وساز است. در

مدیریت پروژه‌های عمرانی با رأس بنیادی مدیریت زمان به عنوان یکی از حوزه‌های مهم و چالش‌برانگیز در جهان امروز

بود. این یافته نشان می‌دهد که ساختار مدیریتی و ثبات در اهداف پروژه، عاملی حیاتی‌تر از بهبود صرفاً فنی است.

۲. حساسیت به منابع انسانی (سناریوی ۲): تغییرات منفی در پارامترهای مرتبط با نیروی انسانی (کاهش آموزش، کاهش تحقیق و توسعه و تناسب حقوق با کار) منجر به افزایش چشم‌گیر زمان اتمام پروژه شد. این امر بر اهمیت حلقه‌های بازخوردی مربوط به انگیزه، خستگی و بهره‌وری تأکید دارد.

۳. اعتبارسنجی قوی: مدل توسعه‌یافته در آزمون بازسازی رفتار مرجع، عملکردی بسیار دقیق از خود نشان داد؛ به طوری که پیش‌بینی مدل برای سناریوی جاری ۸۴۵ روز بود، در حالی که مدت زمان واقعی پروژه مطالعه موردی ۸۵۰ روز (۲ سال و ۴ ماه) ثبت شده است، که نشان‌دهنده خطای کمتر از ۱٪ است.

مدل معرفی شده در این پژوهش، موجب شناخت و یادگیری بهتر پروژه‌های عمرانی می‌گردد و درک درستی از ارتباط عوامل مؤثر بر زمان ارائه می‌دهد. همچنین، می‌تواند عوامل و ارتباط بین آن‌ها را به درستی نشان دهد. با توجه به تناسب بین رفتار مدل و دنیای واقعی و همچنین آزمون‌های اعتبارسنجی مدل، می‌توان گفت در مدل پیشنهادی فرایند انتخاب متغیرها، مفهوم‌سازی و نوشتن معادلات ریاضی، ساختار و رفتار سیستم تا حد مطلوبی درست شناسایی شده است. عمده روابط بین متغیرها مبتنی بر مطالعات کتابخانه‌ای است و مابقی بر اساس منطق حاکم و رفتار غالب تدوین شده است. مدل ارائه‌شده با تغییر در مقادیر مرتبط و بازنویسی مجدد متغیرهای ثابت در پروژه‌های ساختمانی دیگر قابل استفاده می‌باشد. بنابراین، اهمیت ویژه این تحقیق در عمل محقق خواهد شد، به طوری که می‌توان در اجرا به عنوان کاربرد اساسی مدل‌سازی در صنعت با پیشنهاد سناریوهای جدید، اعمال آن‌ها در مدل و مشاهده اثرات آن‌ها، رفتارهای نامطلوب را بهبود داد و گامی اساسی در راستای ارتقای صنعت ساخت‌وساز برداشت.

اغلب موارد، تأخیر به معنای افزایش هزینه‌های سربار و قرار گرفتن در معرض تورم برای پیمانکار است. حتی با وجود فناوری‌های مدرن، امروزه نیز دیرکرد زمان تکمیل و بهره‌برداری از پروژه‌ها، به دلیل عدم شناخت عوامل و پارامترهای مؤثر بر مدت زمان پروژه‌های عمرانی و عدم درک درست ارتباط و تعامل بین آن‌ها، از برنامه زمان‌بندی اتفاق می‌افتد. در این پژوهش، یک مدل تحلیلی با رویکرد پویایی سیستم برای شناخت عوامل پویایی پروژه و چگونگی تعاملات آن‌ها ارائه شد. هدف از این مطالعه، شناخت عوامل مؤثر بر مدت زمان پروژه‌های عمرانی و کشف ساختارهای بازخوردی مؤثر بر آن بود. این پژوهش نشان داد که چگونه مدل‌های پویایی‌شناسی سیستم برای توصیف و کمی‌سازی اثرات عوامل مختلف بر مدت زمان یک پروژه مورد استفاده قرار می‌گیرند.

نتیجه‌گیری

همان‌طور که گفته شد، غالب مطالعات انجام‌شده در زمینه شناسایی عوامل مؤثر بر دیرکرد پروژه‌های عمرانی با رویکردهای آماری و مبتنی بر جمع‌آوری نظرات از طریق پرسش‌نامه انجام گرفته است. در این تحقیق‌ها عموماً، در بهترین حالت، عوامل مؤثر به درستی شناسایی شده است اما به ارتباط بین این عوامل، چگونگی اثرات متقابل آن‌ها، ارتباطات و بازخوردها پرداخته نشده است. بنابراین، نتایج این تحقیقات نمی‌تواند منجر به شناخت و یادگیری از سیستم شود و این همان شکاف موجود در تحقیقات پیشین است که در نویسندگان برای ارائه مدلی جامع از پارامترها و عوامل مؤثر بر زمان انگیزه ایجاد کرد. پژوهش حاضر با هدف شبیه‌سازی و تحلیل پویایی‌های سیستم مؤثر بر مدت زمان پروژه‌های عمرانی طراحی شد. مدل پویایی سیستم توسعه‌یافته با استفاده از ۴۷ پارامتر شناسایی‌شده از مطالعات کتابخانه‌ای و مصاحبه دلفی، به عنوان ابزاری تحلیلی برای درک ساختارهای بازخوردی پنهان در این پروژه‌ها عمل می‌کند.

خلاصه یافته‌های اصلی مدل

مدل‌سازی SD منجر به شناسایی شش حلقه علت و معلولی اصلی شد که بر زمان‌بندی پروژه تأثیر می‌گذارند. تحلیل سناریوپردازی مهم‌ترین یافته‌های ساختاری را به شرح زیر مشخص کرد:

۱. اولویت کنترل کارفرما (سناریوی ۳): مهم‌ترین عامل در کوتاه‌ترین زمان اتمام پروژه، حذف یا به حداقل رساندن «تغییر در روش اجرا» و «تغییر در سفارش‌ها» ناشی از دخالت کارفرما

جدول ۳ توصیه‌های عملی برای کاهش تأخیرات و بهبود عملکرد پروژه‌های عمرانی

محور راهکار	توصیه عملیاتی مشخص	دلیل مبتنی بر مدل SD
مدیریت قرارداد و ریسک کارفرما	تثبیت فرایند طراحی و اجرا: مدیران پروژه و مشاوران باید تلاش کنند تا روش اجرا و ساختار سفارشات را در فازهای اولیه قرارداد تثبیت نمایند. از اعمال تغییرات روش اجرا توسط کارفرما (به جز در موارد اضطراری) اجتناب شود.	سناریوی سوم نشان داد که حذف تغییر روش اجرا، بهترین عملکرد را دارد. این امر از ورود به حلقه‌های بازخوردی منفی ناشی از عدم قطعیت جلوگیری می‌کند.
سرمایه‌گذاری در منابع انسانی	تضمین پرداخت به موقع حقوق: کارفرمایان باید سازوکار پرداخت حقوق پرسنل پیمانکار را به صورت منظم و بدون تأخیر تضمین کنند. همچنین، تخصیص حداقل بودجه ثابت برای آموزش‌های دوره‌ای پرسنل فنی کلیدی الزامی است.	سناریوی دوم نشان داد که کاهش حقوق و آموزش، مستقیماً بر «انگیزه» و «بهره‌وری» تأثیر منفی می‌گذارد و منجر به افزایش نرخ «دوباره‌کاری» می‌شود.
مدیریت بوروکراسی و ارتباطات	تقویت سازوکار حل مسئله حقوقی: نیاز است برای رسیدگی به مسائل حقوقی، قراردادی و جلسات ذی‌نفعان (حلقه ۳)، زمان‌بندی مشخص و مدیریتی قوی در نظر گرفته شود تا این اقدامات به جای کاهش نرخ کارهای انجام‌شده، صرفاً بخشی از فرایند اداری با زمان‌بندی تعریف شده باشند.	جلسات زیاد و مسائل حقوقی، نرخ پیشرفت پروژه را در صورت عدم مدیریت صحیح، کاهش می‌دهند.

توصیه‌های عملی برای مدیران پروژه و ذی‌نفعان

بر اساس تحلیل‌های کمی و کیفی مدل، توصیه‌های عملی جدول (۳) برای کاهش تأخیرات و بهبود عملکرد پروژه‌های عمرانی ارائه می‌شود.

کاربردها و کارکردهای مدل

مدل ارائه شده، فراتر از صرفاً شناسایی عوامل، یک ابزار کاربردی برای مدیریت پروژه است که می‌تواند در سطوح استراتژیک و تاکتیکی مورد استفاده قرار گیرد. برای پیمانکاران، مدل یک آزمایشگاه شبیه‌سازی فراهم می‌آورد تا اثرات سرمایه‌گذاری بر منابع انسانی (مانند افزایش آموزش و بهبود حقوق) را بر نرخ پیشرفت واقعی بسنجند (همان‌طور که در سناریوی دوم مشاهده شد)، که این امر توجیهی برای تخصیص منابع به فعالیت‌های بهره‌وری‌زا ارائه می‌دهد. برای کارفرمایان، مدل ابزاری برای کنترل ریسک‌های سازمانی است؛ زیرا تأثیر تصمیمات مدیریتی، مانند حذف تغییرات ناخواسته در روش اجرا (سناریوی سوم)، را به صورت کمی بر مدت زمان نهایی پروژه نشان می‌دهد. در نهایت، کارکرد اصلی مدل، افزایش «یادگیری از سیستم» برای هر دو طرف است تا با درک ساختارهای بازخوردی پنهان، سیاست‌هایی را اتخاذ کنند که به طور سیستماتیک موجب کاهش زمان و افزایش کارایی پروژه گردد.

محدودیت‌ها و مسیر تحقیقات آتی

با وجود اعتبارسنجی قوی مدل از منظر ساختاری و رفتاری، محدودیت‌های مدل پویایی سیستم حاضر باید مورد توجه قرار گیرد. این مدل عمدتاً بر دینامیک‌های داخلی مدیریت پروژه و روابط بین عوامل عملیاتی و انسانی متمرکز است، و در نتیجه، ممکن است در شرایطی که نوسانات کلان اقتصادی (مانند تورم‌های شدید و تغییرات ناگهانی شاخص‌های تعدیل) عامل غالب تأخیر باشند، دقت آن کاهش یابد، زیرا اثرات این عوامل به صورت مستقیم مدل‌سازی نشده‌اند. همچنین، مدل در سطح جزئیات تأمین منابع و مدیریت ریسک‌های زنجیره تأمین دارای حوزه‌هایی برای توسعه است. لذا، کاربرد اصلی این مدل در پروژه‌هایی با ثبات نسبی اقتصادی است، و برای تعمیم کامل به شرایط پرنوسان، نیازمند بسط مدل با لحاظ کردن دقیق‌تر ریسک‌های اقتصادی - مالی و مدل‌سازی عدم قطعیت‌های فازی می‌باشد.

یکی دیگر از محدودیت‌های این پژوهش، عدم مدل‌سازی صریح و مجزا برای مفاهیم انتزاعی مانند «فرهنگ سازمانی» و «سبک مدیریت» است. اگرچه اثرات این عوامل بر بهره‌وری و رضایت، از طریق متغیرهای واسطه‌ای مانند رضایت کارکنان و انگیزه در مدل گنجانده شده است، تحقیقات آینده می‌تواند با استفاده از شاخص‌های کمی رفتاری، این مفاهیم را به صورت متغیرهای سطح یا نرخ مجزا به مدل پویایی سیستم اضافه کند.

فوق، با توجه به مطالعات و نتایج به دست آمده، زمینه‌های پیشنهادی جدید زیر نیز در جهت انجام مطالعات آتی در این حوزه پیشنهاد می‌شود:

۱. افزایش جزئیات بیشتر در مورد انواع منابع و هزینه آن‌ها و نیز مدل‌سازی تغییرات احتمالی در مورد نوع و کیفیت منابع.
۲. مدل‌سازی ریسک‌های معمول در پروژه‌ها مخصوصاً در زمینه تدارک منابع، شرایط اقتصادی و تأمین اعتبار.
۳. بسط اثرات کمبود نقدینگی بر روی منابع مختلف و نرخ انجام کار.
۴. تحلیل ماهیتی ریسک‌هایی که روی کل پروژه، در اثر ایجاد دوباره‌کاری، هزینه‌های اضافی و تأخیرات اعمال می‌شود.
۵. یکپارچه‌سازی مدل‌های پویایی سیستم و رویکردهای کلاسیک.

واژه‌نامه

پویایی سیستم‌ها	System Dynamics
مدل‌سازی اطلاعات ساختمان	Building Information Modeling
شاخص‌های پیشرو ایمنی	Safety Leading Indicators
مدیریت کیفیت جامع	Total Quality Management
حلقه دوباره‌کاری کوپر	Cooper's Rework Cycle

سپاسگزاری

در این مطالعه، مرز مدل بر اساس هدف پژوهش در سطح درون‌پروژه تعریف شد و عوامل کلان اقتصادی یا سیاسی در دامنه مدل لحاظ نگردیدند. این تصمیم بر مبنای اصول پویایی سیستم و با هدف حفظ شفافیت ساختار بازخوردی اتخاذ گردید. با این حال، ترکیب داده‌ها و متغیرهای محیطی در چارچوب مدل‌های سطح کلان در پژوهش‌های آینده می‌تواند به شناسایی تعاملات بین‌سازمانی و اثر نوسانات اقتصادی بر مدت زمان اجرای پروژه‌ها کمک کند. همچنین، با وجود موفقیت مدل فعلی در تبیین پویایی‌های تأخیر پروژه، عدم توجه مستقیم به فناوری‌های نوین یک محدودیت برای کاربرد آینده است. پیشنهاد می‌شود که تحقیقات آتی بر ادغام مدل‌سازی پویایی سیستم با مفاهیم مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) و ابزارهای مبتنی بر هوش مصنوعی (AI) متمرکز شوند. این کار مستلزم تعریف پارامترهایی جدید برای تخمین میزان کاهش خطاهای طراحی و افزایش بهره‌وری ناشی از این ابزارها و سپس شبیه‌سازی سناریوهای بهبودیافته در مدل است. اگر چه سناریوپردازی نوعی تحلیل حساسیت کیفی ارائه می‌دهد، اما برای تعیین دقیق‌تر پارامترهای تأثیرگذار، انجام تحلیل حساسیت پارامتری کمی بر روی متغیرهای کلیدی مدل (مانند نرخ دوباره‌کاری، نرخ بهره‌وری منابع، نرخ پیشرفت و نرخ تأخیر در پرداخت) در نرم‌افزار شبیه‌سازی ضروری است. این امر نیازمند دسترسی مستقیم به فایل‌های شبیه‌سازی و داده‌های اولیه دقیق است که در این پژوهش میسر نبود. برای تعمیم نتایج، مدل باید در تحقیقات آتی بر روی داده‌های تاریخی بیشتری از پروژه‌های مختلف اعتبارسنجی شود تا اطمینان حاصل شود که این ساختار پویایی در سایر محیط‌های ساخت‌وساز نیز صادق است. علاوه بر موارد

مراجع

- [1] H. Kerzner, *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2017. [Online].
- [2] T. Williams, "Assessing extension of time delays on major projects," *International Journal of Project Management*, vol. 21, no. 1, pp. 19–26, 2003. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(01\)00060-6](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(01)00060-6)
- [3] M. Sambasivan and Y. W. Soon, "Causes and effects of delays in Malaysian construction industry," *International Journal of Project Management*, vol. 25, no. 5, pp. 517–526, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2006.11.007>
- [4] Ndekugri, N. Braimah, and R. Gameson, "Delay analysis within construction contracting organizations," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 134, no. 9, pp. 692–700, 2008. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2008\)134:9\(692\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:9(692))

- [5] G. Sweis, R. Sweis, A. A. Hammad, and A. Shboul, "Delays in construction projects: The case of Jordan," *International Journal of Project Management*, vol. 26, no. 6, pp. 665–674, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2007.09.009>
- [6] T. Pourrostan and A. Ismail, "Causes and effects of delay in Iranian construction projects," *International Journal of Engineering and Technology*, vol. 4, no. 5, pp. 1793–8236, 2012. [Online].
- [7] B. Abbasnejad and H. Izadi Moud, "Construction delays in Iranian civil engineering projects: An approach to the financial security of construction business," *Life Science Journal*, vol. 10, no. 2, pp. 2632–2637, 2013. [Online].
- [8] M. Mukuka, C. Aigbavboa, and W. Thwala, "A theoretical assessment of the causes and effects of construction project delay," in *Proceeding CEE 2013*, pp. 174–177, 2013. [Online]. Available: <https://ceeconference.org>
- [9] J. D. Owolabi, M. A. Lekan, C. O. Oloke, O. Olusanya, P. Tunji-Olayeni, and P. D. Owolabi, "Causes and effect of delay on project construction delivery time," *International Journal of Education and Research*, vol. 2, no. 2, pp. 197–208, 2014. [Online].
- [10] M. Tafazzoli and P. P. Shrestha, "Investigating causes of delay in US construction projects," in *Proc. 53rd ASC Annu. Int. Conf.*, pp. 611–621, 2017. [Online].
- [11] J. M. Lyneis, K. G. Cooper, and S. A. Els, "Strategic management of complex projects: A case study using system dynamics," *System Dynamics Review*, vol. 17, no. 3, pp. 237–260, 2001. [Online].
- [12] P. N. Repenning, "A simulation-based approach to understanding the dynamics of innovation implementation," Sloan School of Management, MIT, Cambridge, MA, USA, Tech. Rep., 1999. [Online].
- [13] S. Howick, *Using System Dynamics Models with Litigation Audiences*. Dept. of Management Science, Univ. of Strathclyde, Glasgow, U.K., 2001. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.08.041>
- [14] S. Chritamara, S. O. Ogunlana, and N. Bach, "System dynamics modeling of design and build construction projects," *Construction Innovation*, vol. 4, no. 3, pp. 593–603, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5592/otmcj.2012.3.3>
- [15] P. E. Love, "Using systems dynamics to better understand change and rework in construction project management systems," *International Journal of Project Management*, vol. 20, no. 6, pp. 425–436, 2002. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(01\)00039-4](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(01)00039-4)
- [16] J. M. Bonner, R. W. Ruekert, and O. C. Walker, Jr., "Upper management control of new product development projects and project performance," *Journal of Product Innovation Management*, vol. 19, no. 3, pp. 233–245, 2002. [Online].
- [17] S. Howick, "Using system dynamics to analyse disruption and delay in complex projects for litigation: Can the modelling purposes be met?," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 54, no. 3, pp. 222–229, 2003. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601502>
- [18] C. K. Chang, "Quantifying the impact of schedule compression on labor productivity for mechanical and sheet metal contractor," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 133, no. 4, pp. 287–296, 2007. [Online].
- [19] M. H. Sebt, A. Gereei, and T. H. Naghash, "A comprehensive framework for integrated management of opportunities and threats by using dynamic system," *International Journal of Civil Engineering*, vol. 7, no. 3, pp. 161–169, 2009. [Online].

- [20] B. Dangerfield, S. Green, and S. Austin, "Understanding construction competitiveness: The contribution of system dynamics," *Construction Innovation*, vol. 10, no. 4, pp. 408-420, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1108/14714171011083579>
- [21] M. J. Mawdesley and S. Al-Jibouri, "Modelling construction project productivity using systems dynamics approach," *International Journal of Productivity and Performance Management*, vol. 59, no. 1, pp. 18-36, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1108/17410401011006095>
- [22] S. K. Wan, M. Kumaraswamy, and D. T. Liu, "Dynamic modelling of building services projects: A simulation model for real-life projects in the Hong Kong construction industry," *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 57, nos. 9-10, pp. 2054-2066, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.6106/JCEPM.2013.3.3.035>
- [23] Alvanchi, S. Lee, and S. AbouRizk, "Dynamics of working hours in construction," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 138, no. 1, pp. 66-77, 2012. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000384](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000384)
- [24] G. Ye, "Simulating effects of management measures on the improvement of the environmental performance of construction waste management," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 62, pp. 56-63, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.01.010>
- [25] W. Yu-jing, "Application of system dynamics in construction project planning and control," in *Proc. 2012 2nd Int. Conf. on Business Computing and Global Informatization (BCGI)*. IEEE, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/BCGIN.2012.20>
- [26] S. Han, P. Love, and F. Peña-Mora, "A system dynamics model for assessing the impacts of design errors in construction projects," *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 57, nos. 9-10, pp. 2044-2053, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2011.06.039>
- [27] F. Nasirzadeh and P. Nojedehe, "Dynamic modeling of labor productivity in construction projects," *International Journal of Project Management*, vol. 31, no. 6, pp. 903-911, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2012.11.003>
- [28] S. P. Warhoe, *Applying Earned Value Management to Design-Bid-Build Projects to Assess Productivity Disruption: A System Dynamics Approach*. Boca Raton, FL, USA: Universal-Publishers, 2013. [Online]. Available: <https://www.universal-publishers.com>
- [29] F. Nasirzadeh, "Modeling quality management in construction projects," *International Journal of Civil Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 14-22, 2013. [Online]. Available: <https://ijce.iust.ac.ir>
- [30] Z. Ding, "A system dynamics-based environmental performance simulation of construction waste reduction management in China," *Waste Management*, vol. 51, pp. 130-141, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.001>
- [31] S. Abotaleb and I. H. El-adaway, "Managing construction projects through dynamic modeling: Reviewing the existing body of knowledge and deriving future research directions," *Journal of Management in Engineering*, vol. 34, no. 6, p. 04018033, 2018. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001797](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001797)
- [32] Z. G. Al-Kofahi, A. Mahdavian, and A. Oloufa, "System dynamics modeling approach to quantify change orders impact on labor productivity: Principles and model development comparative study," *International Journal of Construction Management*, pp. 1-12, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/15623599.2020.1711494>

- [33] S. Mohammadrezaytayebi, M. H. Sebt, and M. R. Afshar, "Introducing a system dynamic-based model of quality estimation for construction industry subcontractors' works," *International Journal of Construction Management*, pp. 1–15, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/15623599.2021.1899592>
- [34] M. Golshaniman, "Providing a system dynamic model to predict construction status in Iran using sustainable development indicators," *Journal of Industrial Engineering International*, vol. 17, no. 3, pp. 1–19, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.30495/JIEI.2021.1929444.1119>
- [35] C. Wang, "System dynamics tool for entropy-based risk control on sleeve grouting in prefabricated buildings," *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 29, no. ?, pp. ?, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1108/ECAM-01-2021-0048>
- [36] M. Dadashi Haji and B. Behnam, "An automated BIM and system dynamics tool for assessing safety leading indicators in construction projects," *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, vol. 43, no. 3, pp. 414–439, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1108/IJBPA-05-2022-0072>
- [37] H. Riaz, K. I. A. Khan, F. Ullah, M. B. Tahir, M. Alqurashi, and B. T. Alsulami, "Key factors for implementation of total quality management in construction sector: A system dynamics approach," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 14, no. ?, pp. ?, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101903>
- [38] M. A. Al-Arihshi, S. Alwabel, B. Almansour, and M. Alshahrani, "BIM impact on construction project time using system dynamics in Saudi Arabia's construction," *Buildings*, vol. 13, no. 9, p. 2267, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/buildings13092267>
- [39] L. Zhao, X. Qin, and C. Chen, "Research on risk factors of construction project delays based on system dynamics," *Procedia Computer Science*, in *Proc. 12th Int. Conf. on Information Technology and Quantitative Management (ITQM 2025)*, vol. 266, pp. 349–356, 2025. [Online]. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.08.044>
- [40] Bryman, *Social Research Methods*. Oxford, U.K.: Oxford Univ. Press, 2016. [Online].
- [41] K. Brockhoff, "The performance of forecasting groups in computer dialogue and face-to-face discussion," in *Large-Scale Projects: Management Trends for Major Projects*. Addison-Wesley Publishing Co., 1975. [Online].
- [42] D. M. Boje and J. K. Murnighan, "Group confidence pressures in iterative decisions," *Management Science*, vol. 28, no. 10, pp. 1187–1196, 1982. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1287/mnsc.28.10.1187>
- [43] M. R. Hallowell and J. A. Gambatese, "Qualitative research: Application of the Delphi method to CEM research," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 136, no. 1, pp. 99–107, 2010. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000137](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000137)
- [44] Sushil, *System Dynamics: A Practical Approach for Managerial Problems*. New Delhi, India: Wiley Eastern Ltd., 1993. [Online].
- [45] M. Park, "Model-based dynamic resource management for construction projects," *Automation in Construction*, vol. 14, no. 5, pp. 585–598, 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app11083681>
- [46] J. D. Sterman, "System dynamics modeling for project management," unpublished manuscript, Cambridge, MA, USA, 1992. [Online].
- [47] D. N. Ford, "The dynamics of project management: An investigation of the impacts of project processes and coordination on performance," Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Boston, MA, USA, 1995. [Online]. Available: <https://dspace.mit.edu>

- [48] S. A. Assaf and S. Al-Hejji, "Causes of delay in large construction projects," *International Journal of Project Management*, vol. 24, no. 4, pp. 349–357, 2006. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2005.11.010>
- [49] S. Kermanshachi, R. Thakur, and P. Govan, "Discovering the impact of late change orders and rework on labor productivity: A water treatment case study analysis using system dynamics modeling," in *Proc. Construction Research Congress 2018*, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1061/9780784481295.069>
- [50] F. P. Davidson and G. Huot, "Large-scale projects: Management trends for major projects," *Cost Engineering*, vol. 33, no. 2, p. 15, 1991. [Online].
- [51] J. M. Lyneis and D. N. Ford, "System dynamics applied to project management: A survey, assessment, and directions for future research," *System Dynamics Review*, vol. 23, nos. 2–3, pp. 157–189, 2007. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com>
- [52] M. Loosemore, *Essentials of Construction Project Management*. Sydney, Australia: UNSW Press, 2003. [Online]. Available: <https://www.unswpress.org.au>
- [53] M. Odeh and H. T. Battaineh, "Causes of construction delay: Traditional contracts," *International Journal of Project Management*, vol. 20, no. 1, pp. 67–73, 2002. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(00\)00037-5](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(00)00037-5)
- [54] M. Sayedyahosseini, "Application of system dynamics model in management of hydroelectric power plants," Iranian Association for Energy Economics (IRAEE), Tehran, Iran, Tech. Rep., 2009. [Online]. Available: <https://iraee.org/en/home-en/>
- [55] J. W. Forrester, *Urban Dynamics*. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1969.
- [56] J. D. Sterman, *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2000.

